



ACQUISITION DE DONNEES ET SURVEILLANCE EN LIGNE DU DETECTEUR D'ONDES GRAVITATIONNELLES VIRGO

Didier Verkindt

► To cite this version:

Didier Verkindt. ACQUISITION DE DONNEES ET SURVEILLANCE EN LIGNE DU DETECTEUR D'ONDES GRAVITATIONNELLES VIRGO. Cosmologie et astrophysique extragalactique [astro-ph.CO]. Université de Savoie, 2007. tel-00163735

HAL Id: tel-00163735

<https://theses.hal.science/tel-00163735>

Submitted on 18 Jul 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

Acquisition de données et Surveillance en ligne du détecteur d'Ondes Gravitationnelles Virgo

présenté à l'Université de Savoie par

Didier Verkindt

soutenu le 14 mai 2007 devant la commission d'examen :

Daniel	DECAMP	<i>Président</i>
Olivier	CALLOT	<i>Rapporteur</i>
Dominique	BOUTIGNY	<i>Rapporteur</i>
Francesco	FIDECARO	<i>Rapporteur</i>
Benoît	MOURS	

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dominique Boutigny, Olivier Callot et Francesco Fidecaro qui ont accepté d'être rapporteurs pour ce mémoire d'Habilitation. Je tiens également à remercier Daniel Decamp et Benoît Mours pour avoir accepté de faire partie du jury qui a examiné le travail décrit ici.

De plus, même si j'ai fait le choix de ne pas présenter mes activités d'il y a plus de 10 ans, je souhaite remercier également les personnes avec lesquelles j'ai travaillé sur l'expérience NOMAD, notamment Henri Pessard qui, par sa curiosité insatiable et son désir permanent d'approfondir les questions qu'on lui pose, m'a fait goûter à l'agréable "saveur des neutrinos".

Même si il peut sembler parfois solitaire, un travail ne se fait jamais seul. Beaucoup de personnes ont contribué à orienter ou améliorer mon travail dans l'expérience Virgo, que ce soit par l'aide qu'ils ont apportée, les travaux qu'ils ont réalisés ou les motivations qu'ils m'ont données en exprimant leurs souhaits ou leurs besoins. Je tiens donc à remercier la collaboration Virgo et plus spécialement le groupe du LAPP grâce auxquels je me suis embarqué dans une aventure passionnante qui n'est pas encore terminée : celle d'une recherche multidisciplinaire où j'ai pu découvrir, de près ou de loin, une grande diversité de compétences.

Pendant de nombreuses années, mon aventure dans Virgo a été étroitement liée à l'aventure d'un petit groupe de personnes motivées qui a conçu, mis en place et amélioré le système d'acquisition de données de Virgo. Merci à eux. Parmi ces personnes, je tiens à remercier plus particulièrement Fatih Bellachia, Laurent Fournier, Alain Masserot et Benoît Mours qui m'ont beaucoup appris que ce soit sur le plan technique, scientifique, humain ou culturel.

Je remercie également Damir Buskulic qui a d'une part fourni au dataDisplay les premières lignes de code nécessaires à une importante amélioration, l'utilisation de la librairie Root, et qui a d'autre part régulièrement contribué aux activités de diffusion de la culture scientifique au LAPP.

Un grand merci également à tous ceux qui, au LAPP, ont participé à la diffusion de la culture scientifique, notamment Gérard Dromby, infographiste imaginatif, Nicole Berger, documentaliste pleine d'initiative et d'enthousiasme, ainsi que Jean-Marc Dubois et Laurent Giacobone, mécaniciens aux doigts de fée.

Merci enfin à Isabelle De Bonis qui a aussi beaucoup donné pour la diffusion de la culture scientifique et qui a surtout accepté de relire avec attention ce mémoire d'habilitation. Elle a été un immense soutien tout au long de ce travail, fragile comme une montagne et subtile comme une onde gravitationnelle.

...

"Ce ne sont pas nos aptitudes ou nos connaissances qui font de nous ce que nous sommes, ce sont nos choix." - A. Dumbledore

Table des matières

Introduction	3
1 Les neutrinos aujourd'hui	6
1.1 Bref historique des neutrinos	6
1.2 Les résultats de l'expérience NOMAD	9
1.3 Résultats actuels et expériences futures	10
2 Les ondes gravitationnelles aujourd'hui	13
2.1 Bref historique des ondes gravitationnelles	13
2.2 Quelques sources possibles d'ondes gravitationnelles	14
2.2.1 Les Supernovae	15
2.2.2 Les Pulsars	15
2.2.3 Les Coalescences de systèmes binaires	15
2.3 Les détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles	16
2.3.1 Principe de détection	16
2.3.2 Bref historique des détecteurs interférométriques	18
2.3.3 Les détecteurs interférométriques en 2007	19
2.3.4 L'avenir de la détection des ondes gravitationnelles	21
3 Le détecteur Virgo	23
3.1 Un interféromètre de 3 km	23
3.2 Le détecteur Virgo et ses principales sources de bruit	25
3.2.1 Bruit sismique	26
3.2.2 Bruits thermiques	27
3.2.3 Bruit de photons	27
3.2.4 Bruits environnementaux	27
3.2.5 Bruits du système d'injection	27
3.2.6 Bruits de contrôle	28
3.2.7 Bruits transitoires	28
3.3 Les contrôles de l'interféromètre et l'automatisation de la procédure de verrouillage	28
3.4 Les performances du détecteur Virgo en 2007 : stabilité et sensibilité	30
3.5 Commissioning de l'interféromètre	31
3.6 Mes contributions au commissioning de l'interféromètre	33

4	Le système d'acquisition de données de Virgo	35
4.1	Cadre général	35
4.2	Le format "frame"	36
4.3	La librairie Fd	37
4.4	Le Main Frame Builder	37
4.5	Les utilitaires du DAQ	38
4.6	Schéma général de l'acquisition de données de Virgo	40
4.7	Accès aux données et traitements en ligne	43
4.7.1	Accès différé aux données	43
4.7.2	Accès en ligne aux données	44
4.7.3	Traitements en ligne enrichissant le flux de données brutes	44
4.7.4	Traitements en ligne créant de nouveaux flux de données	45
4.8	Surveillance du système d'acquisition de données	46
4.8.1	Surveillance du stockage des données	46
4.8.2	Surveillance de la propagation des données	47
4.8.3	Surveillance des serveurs du DAQ	47
4.9	Performances du système d'acquisition de données	48
4.10	L'évolution future du DAQ	51
5	La surveillance en ligne de Virgo	53
5.1	Le dataDisplay	53
5.1.1	Exemples d'utilisation du dataDisplay	55
5.1.2	Caractéristiques techniques	56
5.1.3	Perspectives et améliorations du dataDisplay	58
5.2	La qualification des données	59
5.2.1	Les algorithmes de qualification des données	59
5.2.2	Utilisation des "flags" de qualité	61
5.2.3	Architecture de la qualification des données	62
5.3	Surveillance Web	63
6	Analyse en ligne du bruit du détecteur. Recherche de signaux transitoires	66
6.1	Cadre général	66
6.2	Les signaux transitoires dans Virgo	67
6.3	Les algorithmes de recherche de signaux transitoires	69
6.3.1	glitchMoni	69
6.3.2	outlierMoni	72
6.3.3	VirgoHACR	74
6.3.4	Algorithmes de recherche de "bursts" d'ondes gravitationnelles	75
6.4	Mise en ligne des algorithmes de recherche de signaux transitoires	76
6.5	Suivi de la non-stationnarité du bruit	78
6.6	Perspectives sur la recherche de signaux transitoires et sur l'étude de la stationnarité du signal de frange noire	80
	Conclusion et perspectives sur l'expérience Virgo	81

7	Autres activités scientifiques	82
7.1	Introduction	82
7.2	Diffusion de la culture scientifique auprès du grand public	83
7.3	Diffusion de la culture scientifique auprès des scolaires	86
7.4	Conception de pages web	88
7.5	Responsabilités dans le domaine de la communication scientifique	89
7.6	Conclusions	89
8	Conférences, séminaires et encadrement de stages	91
8.1	Participation à des conférences	91
8.2	Présentations et séminaires	91
8.3	Encadrement de stages	92
Annexe A The VIRGO Online Data Selection, a proposed off-line data analysis environment and an algorithms interface for GW Data Analysis		97
Annexe B Data acquisition and online processing for the Virgo experiment		99
Annexe C Data Acquisition System of the Virgo Gravitational Waves Interfe- rometric Detector		101
Annexe D Search for non-Gaussian events in the data of the VIRGO E4 engi- neering run		103

Introduction

Ce document, présenté en vue d'obtenir l'habilitation à diriger des recherches, décrit les activités de recherche et de diffusion de la culture scientifique que j'ai menées depuis l'obtention de ma thèse de doctorat.

Mon travail de recherche sur ces 15 dernières années a été consacré principalement à deux domaines : d'une part la recherche du phénomène d'oscillations des neutrinos, auprès du détecteur NOMAD au CERN (1994-1997), d'autre part la recherche d'ondes gravitationnelles avec l'interféromètre Virgo (1991-1993 et 1997 à aujourd'hui).

Cette introduction fait un bref résumé de ma participation aux expériences NOMAD et Virgo.

Participation à l'expérience Nomad

En octobre 1993, après une thèse dans le domaine des ondes gravitationnelles, j'ai obtenu un poste de chargé de recherche au CNRS. J'ai alors abordé une nouvelle thématique de recherche : les oscillations des neutrinos, en rejoignant au LAPP, pendant 4 ans, le groupe impliqué dans l'expérience NOMAD. Cette expérience [4][5] tentait de détecter des interactions de neutrinos ν_τ ou ν_e dans un détecteur qui était la cible d'un faisceau de neutrinos ν_μ générés grâce aux protons du SPS du CERN. A mon arrivée dans le groupe du LAPP, NOMAD était déjà conçue et financée et sa construction venait de débuter.

J'ai participé aux tests de qualification et aux tests en faisceau du détecteur à rayonnement de transition (TRD) dont le LAPP et le CERN avaient la responsabilité. Le TRD [6][7] était un des détecteurs de NOMAD conçu pour permettre une excellente distinction entre les électrons et les pions et améliorer ainsi l'identification des interactions de ν_τ . Le TRD était un détecteur relativement nouveau qui permettait, avec le calorimètre électromagnétique, d'assurer une réjection des pions d'un facteur 10^5 pour une efficacité d'identification des électrons de 90%. Ce détecteur était constitué d'une alternance de feuilles de polypropylène et de gaps d'air provoquant l'émission de photons X par les électrons qui les traversent. La détection de ce rayonnement de transition était assurée par un ensemble de détecteurs proportionnels. Il était important de bien connaître la dépendance de la réponse de ces détecteurs en fonction de divers paramètres (haute tension, température, humidité, pression, pollution par l'oxygène). J'ai donc réalisé, sur un petit prototype de ce détecteur proportionnel, un ensemble de mesures qui ont fait l'objet de deux Memo Nomad [8][9] et qui se trouvent décrites partiellement dans un article consacré au TRD [6].

J'ai travaillé ensuite, de mars 1995 à mai 1997, au sein du groupe de production Monte-Carlo de l'expérience. J'ai eu notamment la charge du programme Fortran permettant de vérifier le

contenu des banques ZEBRA à la sortie du programme Monte-Carlo GENOM de l'expérience et de contrôler, par des histogrammes "benchmarks", la qualité des données Monte-Carlo.

En parallèle, en collaboration avec Saclay, Paris VI et UCLA, j'ai étudié les discontinuités du rayon de courbure le long des traces reconstruites dans le détecteur NOMAD. Ceci afin de mettre en évidence l'émission de photons de "Bremsstrahlung", donc de permettre à la fois une meilleure connaissance de l'impulsion des électrons mais aussi d'améliorer l'efficacité de reconstruction des électrons en repérant une partie de ceux qui n'étaient pas identifiés par le TRD ou le calorimètre électromagnétique. Utilisant la production Monte-Carlo et les données réelles, cette analyse a fait ensuite l'objet d'un Memo Nomad [10].

Enfin, j'ai réalisé, à l'occasion des 20 ans du LAPP, un ensemble de pages web sur l'histoire des neutrinos (<http://lapp.in2p3.fr/neutrinos>) qui ont été remarquée entre autres par le magazine La Recherche, et encouragées par plusieurs physiciens, dont G. Cohen-Tannoudji et J. Bahcall. Elles sont aujourd'hui référencées par de nombreuses autres pages web, notamment celle du Particle Data Group.

Participation à l'expérience Virgo

J'ai effectué mon travail de thèse au LAPP à Annecy de 1991 à 1993, dans l'expérience Virgo. Au-delà d'un premier travail de compréhension des coalescences d'étoiles binaires et de simulation du signal reçu par le détecteur Virgo, il s'agissait d'élaborer des algorithmes rapides de détection de ce signal noyé dans le bruit simulé du détecteur [1]. J'ai, pour cela, utilisé la simulation SIESTA du détecteur Virgo [3], dont le développement venait de commencer et auquel j'ai participé. Mon choix de faire une thèse dans l'expérience Virgo était motivé par mon intérêt de longue date pour l'astrophysique mais aussi par un défi qui me paraissait impossible : la détection des ondes gravitationnelles. Au-delà de la découverte du monde de la recherche et de la physique des ondes gravitationnelles, ce fut aussi l'occasion d'apprendre un nouveau langage informatique, le langage C (qui allait devenir un outil essentiel dans les années suivantes pour mon travail sur l'acquisition de données de Virgo) et d'acquérir des notions de traitement du signal, en particulier dans le domaine des ondelettes. Mon travail de thèse a fait l'objet d'un article paru dans Astroparticle Physics en avril 1994 [2].

Après l'obtention d'un poste de chargé de recherche au CNRS puis 4 années d'apprentissage et de découverte du neutrino dans l'expérience NOMAD, j'ai rejoint en juin 1997 le groupe du LAPP associé à l'expérience Virgo. Cette expérience utilise un interféromètre de 3 km de long pour tenter de détecter les ondes gravitationnelles. Sa construction, près de Pise, en Italie, a commencé en 1996 et les premières prises de données de mise au point du détecteur (commissioning) ont commencé en septembre 2001. Virgo s'apprête aujourd'hui à prendre des données scientifiques en coïncidence avec le run S5 du détecteur américain LIGO.

J'ai participé activement à la conception et à la réalisation d'une grande partie du système d'acquisition de données de l'expérience, à sa mise en place ainsi qu'aux diverses étapes de sa mise en route (commissioning). J'ai eu la responsabilité de l'acquisition de données de Virgo pendant trois ans, avant de m'impliquer dans la surveillance en ligne du détecteur et dans la recherche de bruits impulsifs ("glitches") dans les différents signaux issus du détecteur. Parallèlement, j'ai aussi réalisé un dataDisplay permettant de visualiser en ligne les données

de l'expérience. Cet outil a été largement utilisé dans la collaboration Virgo et s'est avéré une aide précieuse pour le "commissioning" du détecteur. Il a d'autre part suscité l'intérêt d'autres expériences de recherche d'ondes gravitationnelles comme LIGO et AURIGA.

Actuellement, je continue à maintenir certains outils logiciels pour l'acquisition de données et j'ai la responsabilité des outils logiciels permettant la surveillance en ligne du détecteur Virgo et l'étude en ligne des bruits du détecteur (glitches, non-stationnarités...). En parallèle, j'assure une responsabilité éditoriale puisque je suis membre du comité éditorial de Virgo depuis octobre 2004.

Sans toutefois occulter totalement le thème des neutrinos, j'ai souhaité centrer mon mémoire d'habilitation à diriger les recherches sur la détection des ondes gravitationnelles avec l'interféromètre Virgo. Après un court chapitre sur l'historique et l'état actuel de la recherche sur les oscillations des neutrinos (chapitre 1) je consacre donc la majeure partie de ce mémoire aux ondes gravitationnelles. Je fais tout d'abord un bref rappel historique suivi d'un état des lieux de la recherche sur les ondes gravitationnelles (chapitre 2). Je décris ensuite le détecteur Virgo (chapitre 3) et mes contributions à l'expérience Virgo dans les domaines de l'acquisition de données (chapitre 4), de la surveillance en ligne du détecteur (chapitre 5) et de l'étude du bruit du détecteur (chapitre 6).

Enfin, après avoir conclu sur mon travail dans Virgo, je termine ce mémoire d'habilitation par la description de mes activités liées à la diffusion de la culture scientifique (chapitre 7).

Chapitre 1

Les neutrinos aujourd'hui

D'après les connaissances actuelles, le neutrino est une particule élémentaire de spin $1/2$, sans doute de masse non nulle et sensible uniquement à la gravitation et à l'interaction faible. Durant les 60 dernières années, les physiciens ont cherché à savoir si cette particule existait, puis à déterminer ses propriétés et, plus généralement, celles de l'interaction faible qui classe les particules élémentaires en différentes saveurs. Ils ont surtout cherché à savoir si le neutrino avait une masse. Pour cela, différents types d'expérience ont été réalisés, soit en mesurant le spectre de la radioactivité β , soit en détectant les neutrinos terrestres (auprès de centrales nucléaires ou d'accélérateurs de particules), soit en détectant les neutrinos venus du ciel (neutrinos solaires, atmosphériques ou cosmiques).

1.1 Bref historique des neutrinos

L'idée du neutrino est née en 1930, lorsque Wolfgang Pauli tenta une opération désespérée de sauvetage du principe de conservation de l'énergie dans le phénomène de radioactivité β . Le 4 décembre 1930, invité à une réunion de physiciens à Tübingen, il envoie à ses collègues une lettre sérieuse et humoristique débutant par *"Chers dames et messieurs radioactifs..."* et contenant l'hypothèse hardie de *"la possibilité d'existence dans les noyaux de particules neutres de spin $1/2$, obéissant au principe d'exclusion, mais différentes des photons parce qu'elles ne se meuvent pas à la vitesse de la lumière, et que j'appelle neutrons. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeur que celle des électrons et ne doit en aucun cas excéder 0.01 fois la masse du proton"*.

En février 1932, J. Chadwick découvre le neutron, mais le neutron est trop lourd et ne correspond donc pas à la particule imaginée par Pauli. Au Congrès Solvay de Bruxelles, en octobre 1933, Pauli déclare à propos de ces particules : *"... leur masse ne peut pas dépasser beaucoup celle de l'électron. Pour les distinguer des neutrons lourds, Monsieur Fermi a proposé le nom de neutrinos. Il est possible que la masse propre des neutrinos soit égale à zéro..."*

En 1933, F. Perrin montre que la masse du neutrino doit être beaucoup plus petite que celle de l'électron. Et dès 1934, Hans Bethe et Rudolf Peierls montrent que la section efficace entre les neutrinos et la matière doit être extrêmement faible : des milliards de fois plus faible que celle de l'électron. S'il existait, le neutrino interagirait si peu qu'il pourrait traverser la Terre entière sans dévier de sa trajectoire. En 1939, L. Alvarez montre que le tritium est radioactif.

C'est jusqu'à ce jour la mesure de la désintégration β du tritium qui a fourni la meilleure limite expérimentale directe sur la masse du neutrino [13].

Le neutrino est encore une invention de l'esprit quand, en 1951, Frederick Reines, qui travaille à Los Alamos, parle à Fermi de son idée d'installer un détecteur de neutrinos auprès d'une explosion atomique. En 1952, il rencontre Clyde Cowan et tous deux se décident finalement pour une source de neutrinos moins explosive : le réacteur nucléaire de Hanford, dans l'Etat de Washington. Leur expérience utilise environ 400 litres d'un mélange d'eau et de chlorure de cadmium. Elle est proposée en février 1953 et réalisée au printemps. Mais le signal n'est pas convaincant. Ils recommencent leur expérience en 1956 auprès du réacteur de Savannah River, en Caroline du Sud. Les améliorations apportées permettent de mieux éliminer le bruit de fond et de découvrir enfin le neutrino [11]. Ce qui vaudra le prix Nobel à Reines en 1995 (Clyde Cowan étant décédé).

En 1959, M. Schwartz imagine avec T.D. Lee la production d'un faisceau de neutrinos provenant de la désintégration du pion, particule produite en grande quantité lorsqu'un faisceau intense de protons de grande énergie (plusieurs GeV) rencontre de la matière (une cible en Beryllium). Il s'associe alors à Leon Lederman et Jack Steinberger pour construire, au laboratoire de Brookhaven, une expérience utilisant un faisceau de neutrinos et un détecteur dont l'élément principal est la chambre à étincelles construite par J. Cronin et son équipe, à Princeton. Début 1962, tout est prêt. L'accélérateur délivre quelques centaines de millions de neutrinos par heure, dont 40 environ interagissent avec l'appareillage de façon claire. Dans 6 cas sur 40 la particule provenant de l'interaction du neutrino est reconnue comme étant un électron, ce qui est le bruit de fond attendu. Dans 34 cas sur 40, c'est un muon. Conclusion, il y a deux sortes de neutrinos : le neutrino ν_e et le neutrino ν_μ [12].

Toute une série d'expériences et de découvertes quasiment en parallèle vont alors se succéder. On voit fleurir au CERN, durant les années 70, les expériences CDHS, CHARM, CHARM II, puis BEBC et Gargamelle, qui toutes apportent des résultats marquants pour la compréhension de la structure en quarks des nucléons et permettent également de mieux comprendre l'interaction faible et les propriétés des deux familles de leptons (électron, ν_e) et (muon, ν_μ). Dans les années 1970, M. Perl montre qu'il existe une troisième famille de leptons constituée des particules tau et ν_τ .

Si ils sont de masse non nulle, la mécanique quantique permet aux neutrinos d'osciller, c'est à dire qu'un ν_e peut, au long de son parcours dans l'univers, devenir un ν_μ ou un ν_τ et vice-versa. Plus exactement les états propres de masse ν_1, ν_2, ν_3 se mélangent pour former les états propres d'interaction faible ν_e, ν_μ et ν_τ mais ne voyagent pas à la même vitesse. Les trois états propres d'interaction et les trois états propres de masse sont reliés par une matrice de mélange dont les paramètres sont les angles de mélange $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$, un paramètre δ_{CP} qui exprime la violation de la symétrie CP par les leptons et deux angles de Majorana dont je ne parlerai pas ici. A ces 6 paramètres s'ajoutent les différences de masses au carré $\Delta m_{12}^2, \Delta m_{23}^2, \Delta m_{13}^2$ qui entrent en jeu dans la probabilité d'oscillation des neutrinos. Le but de toutes les expériences de recherche d'oscillation des neutrinos est la détermination d'au moins un de ces paramètres.

En 1979, une expérience menée par F. Reines, toujours auprès du réacteur nucléaire de Savannah River, entreprend de mesurer la proportion de courants neutres par l'interaction d'anti-neutrinos sur du deutérium. Le résultat ne correspond pas aux prévisions théoriques

et pourrait s'expliquer par le phénomène d'oscillation des neutrinos. Sous l'impulsion de ce résultat (qui plus tard sera corrigé par d'autres expériences), une équipe de l'ILL (Institut Laue Langevin) de Grenoble tente de chercher l'oscillation des neutrinos auprès du réacteur de son institut. L'équipe de l'ILL engendre deux équipes : l'une avec un détecteur auprès de Gosgen en Suisse, l'autre avec un détecteur auprès de la centrale du Bugey, entre Lyon et Chambéry. Cette dernière regroupe cinq laboratoires français, dont le LAPP. Les deux expériences Gosgen et Bugey vont imposer des limites fortes sur les paramètres d'oscillation des neutrinos : $\Delta m_{12}^2 < 0.01 \text{ eV}^2$ pour $\sin^2(2\theta_{12}) = 1$ et $\sin^2(2\theta_{12}) < 2 \times 10^{-2}$ pour les grands Δm_{12}^2 [14]. D'autres expériences, comme Chooz, rechercheront aussi des oscillations de neutrinos auprès des réacteurs nucléaires et amélioreront en partie ces limites : $\Delta m_{13}^2 < 7 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$ pour $\sin^2(2\theta_{12}) = 1$ et $\sin^2(2\theta_{12}) < 0.1$ pour les grands Δm_{12}^2 [15].

En 1965, Ray Davis, du laboratoire de Brookhaven, mène la construction, dans la mine de Homestake, sous 3000 mètres de terre et de roche, d'un immense détecteur contenant 378000 litres de perchloroéthylène dans le but de détecter des neutrinos solaires d'énergie supérieure à 0.814 MeV. Ses premiers résultats publiés avec J. Bahcall en 1968 [16] surprennent la communauté scientifique mais ont été largement confirmés depuis : le soleil émet trois fois moins de neutrinos que ce que fournissent les prévisions théoriques [17].

Trente ans plus tard, plusieurs expériences confirment le résultat de R. Davis. Dans les années 1995-1997, les expériences SAGE et GALLEX publient leurs résultats : un déficit d'environ 40% pour quasiment l'ensemble du spectre en énergie des neutrinos solaires [18]. A la même époque, Kamiokande observe un déficit de 50% au-delà de 7.5 MeV. L'expérience de Davis observait un déficit de 70% au-delà de 0.814 MeV. Ces différents résultats restent cohérents si l'on tient compte d'un effet de la matière sur la probabilité d'oscillation des neutrinos (effet MSW) et l'oscillation des neutrinos est donc une hypothèse forte pour expliquer ce déficit. Le déficit en neutrinos solaires devient alors une motivation forte pour rechercher la preuve expérimentale de l'oscillation des neutrinos, l'autre motivation étant qu'un neutrino massif est, à cette époque, un très bon candidat à la matière noire dans l'Univers.

En 1987, les expériences Kamiokande et IMB détectent les neutrinos émis par l'explosion de la supernova SN1987A. C'est la première fois que l'on détecte une supernova autrement qu'avec les télescopes optiques.

En 1989, dès les premiers mois de prises de données du LEP, au CERN, l'étude de la durée de vie du boson Z^0 permet de montrer qu'il n'existe que trois familles de neutrinos légers. Finalement, après combinaison des résultats des quatre expériences LEP, on obtient aujourd'hui : $N_\nu = 2.994 \pm 0.012$ (PDG 2006) Un long chemin a été parcouru depuis les premières désintégrations β reconnues par P. et M. Curie et E. Rutherford en 1898. Le neutrino a été découvert et on sait aujourd'hui qu'il n'y a que trois neutrinos légers... mais la masse des neutrinos reste inconnue.

En 1996, LSND, une expérience américaine auprès d'un faisceau de neutrinos $\bar{\nu}_\mu$ délivré par l'accélérateur LANSCE de Los Alamos, annonce ses résultats [21] : 22 interactions de neutrinos $\bar{\nu}_e$ alors que 4 interactions de ce type étaient attendues en bruit de fond si les neutrinos n'oscillaient pas. LSND annonce une première estimation de la probabilité d'oscillation $P(\nu_e, \nu_\mu) = (0.31 \pm 0.1) \times 10^{-3}$ avec une valeur $\Delta m^2 > 0.2 \text{ eV}^2$.

De 1994 à 1998, deux expériences au CERN, NOMAD et CHORUS, tentent de détecter l'oscillation des neutrinos en cherchant des neutrinos ν_e ou ν_τ dans un faisceau de neutrinos ν_μ obtenus à partir des protons de l'accélérateur de particules SPS du CERN. Les résultats améliorent les limites mais ne fournissent pas de preuves de l'oscillation des neutrinos [19][20]. La preuve arrivera quelques années plus tard grâce à des expériences comme SuperKamiokande, SNO, MINOS, K2K, etc...

1.2 Les résultats de l'expérience NOMAD

L'expérience NOMAD au CERN était un détecteur conçu pour chercher des neutrinos ν_τ dans un faisceau de neutrinos ν_μ créé en envoyant les protons du SPS sur une cible en Béryllium et en canalisant les pions ainsi produits. Si un des ν_μ oscillait en ν_τ et interagissait avec la matière du détecteur, le résultat pouvait être une particule τ se désintégrant dans 17.8% des cas en électron. Le détecteur NOMAD était essentiellement constitué de trois détecteurs.

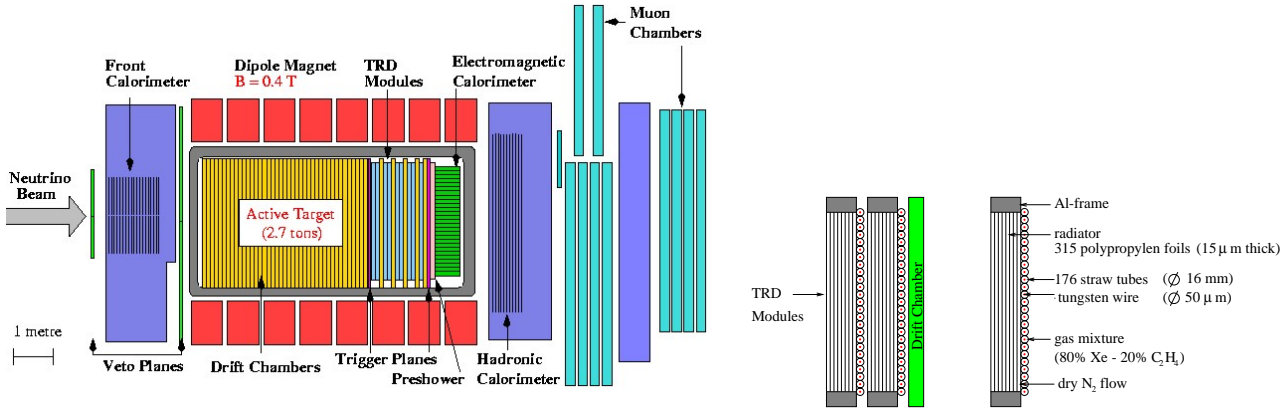


FIG. 1.1 – *A gauche : Schéma montrant les différents sous-détecteur de l'expérience NOMAD. A droite : Schéma montrant le TRD (Déflecteur à Rayonnement de Transition) utilisé essentiellement pour différencier les pions des électrons.*

D'une part, un ensemble de chambre à dérives permettant de reconstruire précisément les traces des particules (avec une précision entre $150\mu\text{m}$ et $800\mu\text{m}$ selon l'angle de la trajectoire). D'autre part, un TRD et un calorimètre électromagnétique dont l'ensemble permettait de fortement différencier les électrons des autres particules (facteur de réjection des pions de 10^5 pour une efficacité d'identification des électrons de 90%). Comme le montre la figure 1.1, cet ensemble était complété par des chambres à muons, un preshower, un calorimètre hadronique et des panneaux de scintillateurs pour assurer le veto contre les interactions dues à des particules autres que les neutrinos du faisceau.

Aucune oscillation de neutrinos ne fut statistiquement observée et les résultats publiés en 1998 puis en 2001 [19] furent des limites sur l'angle de mélange θ_{23} et sur la différence de masse au carré Δm_{23}^2 (oscillation entre ν_μ et ν_τ) :

$$\Delta m_{23}^2 < 0.7 \text{ eV}^2 \text{ pour } \sin^2(2\theta_{23}) = 1 \text{ et } \sin^2(2\theta_{23}) < 3.3 \times 10^{-4} \text{ pour les grands } \Delta m_{23}^2$$

Suite aux résultats positifs de LSND, l'expérience NOMAD a également cherché des oscillations $\nu_\mu - \nu_e$ et a permis de rejeter la possibilité d'une oscillation de neutrinos visible dans LSND avec $\Delta m_{12}^2 > 10 \text{ eV}^2$.

1.3 Résultats actuels et expériences futures

En 1998, une expérience japonaise, SuperKamiokande, constituée d'un énorme détecteur de 50000 tonnes d'eau pure, observe une anomalie dans le nombre de neutrinos atmosphériques et de neutrinos solaires détectés. Dans le même temps, SNO, une expérience réalisée au Canada, tente de détecter les neutrinos solaires ν_e par interaction courant chargé mais aussi les ν_μ et les ν_τ par diffusion élastique. Observant un déficit en neutrinos ν_e en accord avec le nombre de $\nu_\mu + \nu_\tau$ détectés, SNO montre en 2001 que le déficit en neutrinos solaires ν_e est dû à l'oscillation des neutrinos [22]. Une autre expérience japonaise, K2K, utilisant un faisceau de neutrinos, confirme en 2004 les résultats de SuperKamiokande. Enfin, entre 2003 et 2006, l'expérience MINOS, à Fermilab, et l'expérience KamLAND [23], au Japon, trouvent un résultat cohérent avec ceux de K2K, SNO et SuperKamiokande. Ces résultats cohérents entre eux sont incompatibles avec celui de l'expérience LSND... Une autre expérience, MiniBoone, à Fermilab, vient de publier des résultats qui infirment l'observation faite par LSND [24].

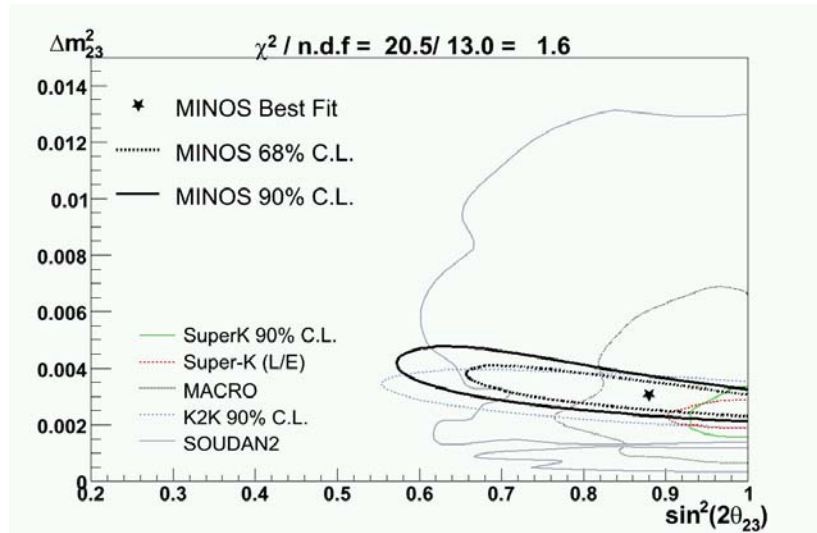


FIG. 1.2 – Résultats des expériences MINOS, K2K et SuperKamiokande dans le plan $\sin^2(\theta_{23})$ - Δm_{23}^2 , qui montrent que les zones les plus probables pour ces deux paramètres.

Les paramètres d'oscillation (angle de mélange $\sin^2(2\theta)$ et différence de masse au carré Δm^2) commencent toutefois à être cernés et les résultats en novembre 2006 étaient les suivants :

$\Delta m_{12}^2 = (7.9 \pm 0.7) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$	$\sin^2(2\theta_{12}) = 0.82 \pm 0.055$
$ \Delta m_{23}^2 = (2.4 \pm 0.04) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	$\sin^2(2\theta_{23}) > 0.95$
$\Delta m_{13}^2 = -\Delta m_{12}^2 - \Delta m_{23}^2$	$\sin^2(2\theta_{13}) < 0.1 \quad (\text{Chooz})$

TAB. 1.1 – Résultats expérimentaux sur les paramètres d'oscillation des neutrinos (février 2007).

Au vu de ces résultats, les physiciens sont aujourd'hui convaincus que les neutrinos oscillent. La figure 1.2 montre plus précisément les résultats publiés par MINOS, K2K et SuperKamiokande en 2006. Depuis la première expérience de Reines et Cowan en 1953, beaucoup d'efforts et de progrès ont été réalisés, mais nous ne connaissons toujours pas tous les paramètres d'oscillation des neutrinos, ni la hiérarchie de masse des neutrinos, ni le modèle qui expliquerait à la fois la présence de neutrinos massifs et l'absence de neutrinos d'hélicité droite.

La quête ne s'arrête donc pas là et plusieurs expériences sont en cours de construction avec pour but de mieux cerner les paramètres d'oscillation des neutrinos. Je citerai ici seulement deux exemples : OPERA et Double Chooz. OPERA¹, sous la montagne du Gran Sasso, tentera à partir de 2008 la détection directe de l'oscillation ν_μ - ν_τ dans la zone des paramètres d'oscillation estimés par MINOS, K2K et SuperKamiokande. Ceci grâce au faisceau de neutrinos ν_μ délivré par le CNGS du CERN, à 732 km de là. Une autre expérience, Double Chooz étudiera à partir de 2010, à deux distances différentes (280 m et 1 km), les neutrinos émis par la centrale nucléaire de Chooz, dans les Ardennes. Ce double détecteur étudiera la disparition des ν_e avec pour objectif de déterminer l'angle de mélange θ_{13} encore inconnu.

En ce qui concerne la mesure absolue de la masse des neutrinos, la désintégration β du tritium a fourni jusqu'à ce jour la mesure directe la plus précise : $m_{\nu_e} < 2 \text{ eV}/c^2$ (PDG 2006). Après les expériences de Mainz et Troitsk [13], une nouvelle expérience, KATRIN² est sur le point de commencer et a pour but d'abaisser cette limite à $m_{\nu_e} < 0.2 \text{ eV}/c^2$. Mais ces dernières années, la cosmologie a fourni de nouveaux éléments. En combinant les résultats de plusieurs mesures cosmologiques (absorption des raies Lyman α de quasars lointains, mesures de redshifts de galaxies par 2dF et SDSS) avec ceux de l'expérience WMAP qui mesure les fluctuations du Fond de Rayonnement Cosmologique, des contraintes fortes sur la masse des neutrinos ont pu être établies [25]. Une limite conservative est : $m_{\nu_e} + m_{\nu_\mu} + m_{\nu_\tau} < 0.71 \text{ eV}/c^2$.

Les expériences futures qui utiliseront des faisceaux de neutrinos auront besoin d'un flux plus important de neutrinos afin d'améliorer la précision des mesures et avoir ainsi accès à tous les paramètres d'oscillation des neutrinos et peut-être aussi à la violation de la symétrie CP dans le secteur leptonique. Les superfaisceaux, comme le JHF développé au Japon pour l'expérience T2K³, seront une première étape. Les détecteurs de neutrinos pourraient de plus être placés "off-axis" pour tirer partie du fait que la dépendance en énergie du flux de neutrinos possède un maximum qui est fonction de l'écart angulaire à l'axe du faisceau. De tels détecteurs "off-axis" associés aux superfaisceaux pourraient déterminer θ_{13} et peut-être apporter également des informations sur la hiérarchie de masses de neutrinos. De nouveaux types de faisceau sont aussi déjà à l'étude, créés non plus à partir de protons envoyés sur une cible fixe mais produits soit à partir de faisceaux d'ions radioactifs β (Bétabeams) soit à partir de faisceaux de muons ("neutrinos factories"). Ces nouveaux dispositifs doivent permettre une augmentation du flux de neutrinos d'un facteur 10 à 100, apportant une amélioration du même ordre de grandeur sur la précision des mesures des paramètres d'oscillation.

En parallèle à cette quête de la masse des neutrinos, deux autres questions importantes sont

¹<http://opraweb.web.cern.ch/opraweb/index.shtml>

²<http://www-ik.fzk.de/tritium>

³<http://jnuosrv01.kek.jp/public/t2k>

soumise à l'expérience depuis les années 1990 : quel type de symétrie gouverne le neutrino ? Et quelles informations sur l'Univers peuvent nous apporter les neutrinos cosmiques ? Mais c'est une autre aventure qui va au-delà de ce court chapitre consacré aux neutrinos...

Je mentionnerai seulement qu'après avoir traqué pendant plusieurs dizaines d'années les neutrinos du soleil, les expériences de détection de neutrinos "extra-terrestres" s'orientent maintenant vers les neutrinos cosmiques de haute énergie, qui pourraient fournir des informations intéressantes sur les sources de rayons cosmiques de haute énergie, les noyaux actifs de galaxies et les sources de sursauts gamma ou bien détecter des neutrinos issus de la désintégration de neutralinos. L'expérience AMANDA¹, faite de longues chaînes de photomultiplicateurs enfouies à plus de 1400 mètres dans la glace du pôle Sud, a déjà détecté plus de 3000 neutrinos. En 2005, issue d'AMANDA, a commencé la construction d'un détecteur d'environ un kilomètre cube : IceCube², qui devrait entrer en fonctionnement à partir de 2011. Une autre expérience, ANTARES³, tente également, dans la mer Méditerranée, de détecter des neutrinos de haute énergie et d'apporter des informations sur les phénomènes violents de l'Univers qui seraient à l'origine des rayons cosmiques. Les premières données sont en cours et la perspective d'ANTARES est de devenir lui aussi un détecteur d'un kilomètre cube.

Qu'ils soient cosmiques, solaires, provenant de centrales nucléaires ou de faisceaux de particules, les neutrinos sont peut-être une des clés pour mieux comprendre des problèmes fondamentaux comme les propriétés de l'interaction faible et la brisure de symétrie CP. Une compréhension détaillée des propriétés des neutrinos se révélera peut-être indispensable pour comprendre la physique des saveurs donc l'organisation des particules élémentaires en 3 familles hiérarchisées en masse.

¹<http://amanda.uci.edu>, <http://www.nu.infn.it/exp/all/amanda>

²<http://icecube.wisc.edu>

³<http://antares.in2p3.fr>

Chapitre 2

Les ondes gravitationnelles aujourd'hui

Les ondes gravitationnelles sont un concept théorique qui a plus de difficultés que les neutrinos à devenir une réalité expérimentale. Il ne s'agit plus de particules de matière de spin $1/2$, de masse très petite et interagissant par interaction faible, mais de modifications de la métrique de l'espace-temps créées par des masses en mouvement asymétrique et accéléré. Comme les neutrinos mais pour d'autres raisons, les ondes gravitationnelles "interagissent" très peu avec la matière. Leur détection est encore plus difficile que celle des neutrinos mais offrirait des informations fondamentales sur les propriétés de l'interaction gravitationnelle en champ fort et sur certains objets astrophysiques. C'est donc également un thème de recherche fondamentale très motivant.

Avant de décrire le détecteur Virgo et mes contributions à son fonctionnement, je rappellerai le contexte historique de la recherche des ondes gravitationnelles. Je décrirai ensuite brièvement quelques unes des sources d'ondes gravitationnelles envisagées et quelles sont les principales motivations de leur détection. Puis je terminerai ce chapitre par quelques mots sur les capacités actuelles des détecteurs interférométriques et sur les projets pouvant aboutir à une véritable astronomie gravitationnelle.

2.1 Bref historique des ondes gravitationnelles

En 1687, Isaac Newton ne fait aucune hypothèse mais n'apprécie pas que sa théorie de la gravitation se fonde sur une action à distance mystérieuse.

En 1864, James Clerk Maxwell écrit dans "A dynamical theory of the electromagnetic field" (1864) : *"Après avoir expliqué l'attraction et la répulsion électrique et magnétique par une action sur le milieu environnant, et avoir trouvé qu'elles varient comme l'inverse du carré de la distance, nous sommes naturellement conduit à nous demander si l'attraction gravitationnelle, qui suit la même dépendance en fonction de la distance, ne serait pas également propagée par une action sur le milieu environnant. Je ne comprends pas comment un milieu peut posséder de telles propriétés [attraction entre masses de même signe], je ne peux donc chercher plus en avant la cause de la gravitation."*

En 1900, Hendrick Antoon Lorentz fait l'hypothèse hardie que la gravitation se propage à la vitesse de la lumière. Puis, en 1905, Henri Poincaré écrit que l'on pourrait envisager que la gravitation ne soit pas une force instantanée mais se propage à la même vitesse que la lumière [26].

En 1918, Albert Einstein mentionne pour la première fois de façon explicite l'existence d'ondes gravitationnelles comme conséquence du formalisme de la théorie de la Relativité Générale [27]. Depuis, de nombreux travaux théoriques [28] sont venus enrichir la Relativité Générale, notamment en ce qui concerne la création et la détection des ondes gravitationnelles.

Une onde gravitationnelle est décrite comme la propagation d'une déformation spatio-temporelle générée par le mouvement accéléré et asymétrique d'une distribution de masses ou d'énergie dans l'univers. Elle est d'origine quadripolaire et peut être décrite dans le cadre d'une linéarisation de l'équation de la Relativité Générale, par deux tenseurs métriques de polarisation perpendiculaire à la direction de propagation avec pour chacun une amplitude dépendante du temps : h_{\times} et h_{+} . Les deux tenseurs sont de petites perturbations à la métrique de Minkowski (espace-temps non courbé) et s'écrivent :

$$\mathbf{h}_{+} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_{+} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -h_{+} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{h}_{\times} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_{\times} & 0 \\ 0 & h_{\times} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Au passage d'une onde gravitationnelle, on observe théoriquement une modification de la distance entre deux masses tests situées dans un plan transverse à la direction de propagation de l'onde gravitationnelle.

En 1974, J.H. Taylor et R.A. Hulse, découvrent un pulsar binaire (couple d'étoiles à neutrons en rotation dont l'une émet un signal électro-magnétique périodique en direction de la Terre), qu'ils baptisent PSR1913+16 [29]. Etudiant pendant plusieurs années ce système binaire, J.H. Taylor montre que sa période orbitale diminue régulièrement. Il compare ce résultat à ce que serait cette diminution si elle n'était due qu'à une perte d'énergie par émission d'ondes gravitationnelles. Après plus de 30 ans d'observation, mesures expérimentales et prédiction théorique sont en accord à 0.1% près [30]. C'est la première, et pour l'instant la seule, preuve indirecte de l'existence des ondes gravitationnelles.

2.2 Quelques sources possibles d'ondes gravitationnelles

L'onde gravitationnelle est d'origine quadripolaire. Elle n'est générée que par des objets en mouvement accéléré asymétrique. Son amplitude est donnée par :

$$h = \frac{2G}{c^4} \frac{1}{r} \ddot{Q} \quad (2.1)$$

où Q est le moment quadripolaire de la source, c la vitesse de la lumière, G la constante de Newton et r la distance à la source. Un ordre de grandeur de cette amplitude peut être obtenu en posant $Q = \epsilon M R^2 T^{-2}$, où M est la masse de la source, R la dimension de la source, T un temps caractéristique d'évolution de la source (période de rotation, durée d'accélération, etc...)

et ϵ l'asymétrie de la source. Cette amplitude, homogène à une variation relative de distance, est beaucoup trop faible pour être détectable lorsque la source est terrestre. La théorie prédit par exemple que les ondes gravitationnelles émises par la Terre dans sa rotation autour du soleil ont une amplitude de l'ordre de $h = 10^{-44}$. Un tel signal est indétectable par les moyens techniques actuels. En revanche, des objets astrophysiques (de l'ordre d'une masse solaire) dans des conditions extrêmes (fortes accélérations, forte asymétrie) ont une valeur \dot{Q} si élevée qu'ils seraient détectables, même situés à plusieurs Mpc¹. Sont présentées ci-dessous les principales sources de ce type envisagées actuellement.

2.2.1 Les Supernovae

Historiquement, les premières sources d'ondes gravitationnelles envisagées ont été les supernovae. Ces étoiles massives en fin de vie génèrent, lors de leur explosion, une quantité d'énergie considérable (jusqu'à $10^{46} J$). Pour les supernovae de type II (possédant encore de l'hydrogène), on estime aujourd'hui qu'environ 99% de cette énergie est emportée par les neutrinos produits lors de l'effondrement du coeur de l'étoile. Le pourcent restant est encore énorme et, si l'effondrement de l'étoile était asymétrique, une partie de cette énergie pourrait être emportée par une onde gravitationnelle d'une intensité suffisante pour être détectable sur Terre. Il reste toutefois beaucoup d'incertitude sur le facteur d'asymétrie ϵ . De nombreux modèles théoriques existent aujourd'hui [37] et tentent de décrire le signal d'onde gravitationnelle émis : l'amplitude prédite varie d'un facteur 100 d'un modèle à l'autre (4.10^{-24} à 4.10^{-22} pour une source située à 1 Mpc). De plus, le taux de supernovae est estimé à environ 1 par an dans un rayon de 10 Mpc. La détection d'ondes gravitationnelles émises par ce type de source reste donc très incertaine.

2.2.2 Les Pulsars

Autres sources souvent envisagées : les pulsars. Ce sont des étoiles qui ont terminé leur vie sous forme d'étoiles à neutrons et qui, tournant rapidement sur elles-même, émettent un signal électromagnétique périodique détecté sur Terre. Si le pulsar possède une légère asymétrie, par exemple liée à l'émission du signal électromagnétique, il possède alors un moment quadripolaire et devient donc une source possible d'ondes gravitationnelles. Mais, le facteur d'asymétrie restant inconnu, la détectabilité des pulsars reste incertaine. Toutefois, des limites supérieures de l'ordre de 10^{-24} ont été déduites de l'observation du ralentissement de la rotation des pulsars. Récemment, l'observation d'une fréquence limite des pulsars millisecondes a plaidé en faveur de l'émission d'ondes gravitationnelles pour expliquer cette limite. Par ailleurs, le grand avantage de ce type de source est sa longévité. Le signal reçu peut alors être intégré sur plusieurs années pour améliorer la capacité de détection.

2.2.3 Les Coalescences de systèmes binaires

Les coalescences de systèmes binaires sont les sources d'ondes gravitationnelles théoriquement les mieux connues. Dans notre galaxie, près de la moitié des étoiles sont en couple. Elles forment un système binaire qui, si les deux étoiles sont suffisamment massives, peut devenir, en fin de vie, un système binaire d'étoiles à neutrons ou de trous noirs. Huit de ces systèmes binaires ont été détectés depuis 1974 (le premier fut PSR 1913+16, les deux derniers sont PSR J0737-3039 et PSR J1906+0746 découverts respectivement en 2003 et 2005). De tels systèmes génèrent

¹ 1 Mpc = 3.26 millions d'années-lumière

théoriquement des ondes gravitationnelles et, perdant de l'énergie gravitationnelle, les deux étoiles se rapprochent alors en spiralant. Cependant, la détection des ondes gravitationnelles émises par le système binaire n'est possible avec les détecteurs actuels que lors de la phase finale de cette orbite spiralante. Les deux étoiles, alors distantes de quelques centaines de kilomètres, forment un système très massif (plusieurs fois la masse du soleil) tournant à grande vitesse (plusieurs milliers de kilomètres par seconde) et émettant des ondes gravitationnelles intenses (plus de 10^{30} Watts). Le signal alors généré est bien connu théoriquement et pourrait être détectable sur Terre. Pour un système formé de deux étoiles à neutrons de 1.4 masses solaires et distant de 10 Mpc, l'amplitude des ondes gravitationnelles arrivant sur Terre serait de l'ordre de $h = 3 \times 10^{-22}$, donc détectable avec les interféromètres aujourd'hui en fonctionnement. Cependant, l'estimation du nombre de coalescences de binaires par an et par galaxie, est très incertaine. Bien que révisée à la hausse par la découverte récente d'un nouveau système binaire d'étoiles à neutrons PSR-J0737-3039 de période orbitale courte (2.4 heures), cette estimation reste faible et entachée d'une grande incertitude : 10^{-5} à 5.10^{-4} par an et par galaxie [31].

De manière générale, les signaux d'ondes gravitationnelles peuvent être à priori classés en trois catégories :

- Les signaux continus (par exemple les signaux de pulsars)
- Les signaux mixtes (par exemple les signaux de coalescences binaires formés d'une partie spiralante bien connue théoriquement et d'une partie coalescente moins bien connue et analogue à un signal transitoire de courte durée)
- Les signaux transitoires (par exemple les signaux de supernovae dont la forme est encore inconnue malgré les tentatives de modélisations [37])

La détection des ondes gravitationnelles est d'abord motivée par la nécessité d'une confirmation expérimentale directe de leur existence. La seconde motivation est la création d'un nouveau type d'observation astronomique qui serait capable de détecter des objets invisibles dans le domaine électromagnétique. Cette nouvelle astronomie apporterait de nouvelles informations sur l'Univers, notamment sur les sources précédemment citées. Ces sources sont des objets astrophysiques très denses évoluant dans un espace-temps fortement courbé (champ gravitationnel très intense). La détection des ondes gravitationnelles émises par ces systèmes apporterait des informations directes pour l'étude de la dynamique gravitationnelle en champ fort.

2.3 Les détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles

2.3.1 Principe de détection

La mesure des distances par un interféromètre utilise le fait que la phase d'une onde électromagnétique dans le vide dépend linéairement de la distance parcourue par cette onde. En faisant interférer deux ondes cohérentes qui ont suivi chacune leur propre chemin optique, on peut en déduire la différence de longueur entre les deux chemins. Un interféromètre de Michelson utilise un faisceau laser séparé en deux faisceaux perpendiculaires par un miroir semi-transparent (séparatrice). Ces deux faisceaux sont réfléchis par des miroirs et, après un ou plusieurs allers-retours dans les bras de l'interféromètre, reviennent interférer entre eux. Si ces deux faisceaux sont en opposition de phase, le résultat de l'interférence est une absence de lumière en sortie de l'interféromètre (frange noire) et toute la lumière est renvoyée vers la source laser. L'in-

terféromètre étant maintenu sur la frange noire, toute modification de longueur ΔL de l'un des deux bras induira une modification de la différence de phase entre les deux faisceaux lumineux et l'apparition de lumière en sortie de l'interféromètre.

Une onde gravitationnelle d'amplitude h produit dans un plan transverse à sa direction de propagation, un accroissement des longueurs $\delta L = 1/2 h L$ selon un axe de ce plan et une diminution des longueurs sur l'autre axe. Un interféromètre de Michelson, qui permet de mesurer la différence de longueur entre deux bras perpendiculaires, apparait donc tout à fait adapté à la détection des ondes gravitationnelles. Comme le montre la figure 2.1, le passage d'une onde gravitationnelle entraîne une modification ΔL de la longueur des bras et l'apparition de lumière en sortie de l'interféromètre. La puissance lumineuse détectée est :

$$P = \frac{P_0}{2} \times (1 - C \cos(\frac{2\pi}{\lambda} \delta L)) \quad (2.2)$$

où λ est la longueur d'onde du laser, P_0 la puissance incidente sur la séparatrice, C le contraste (égal à 1 si les deux miroirs de renvoi sont de même réflectivité) et $\delta L = 2 \times \Delta L$ la différence de longueur entre les deux bras.

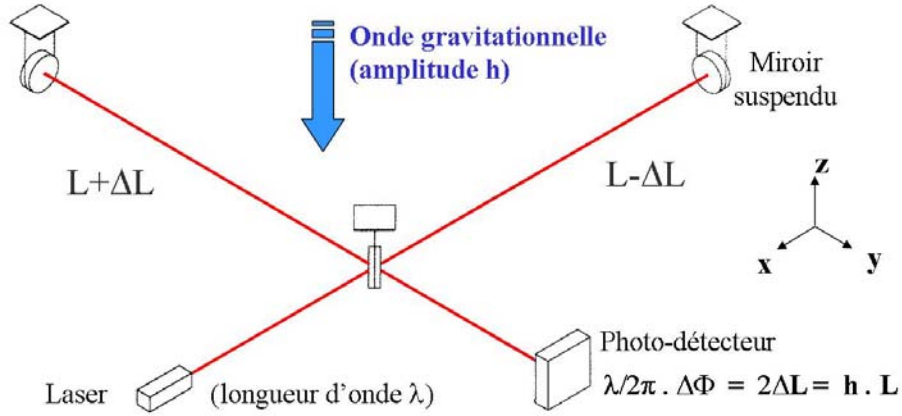


FIG. 2.1 – Principe de détection d'une onde gravitationnelle par un interféromètre de Michelson.

Les prévisions théoriques actuelles et les résultats expérimentaux obtenus avec les précédents détecteurs (interféromètres prototypes ou barres résonantes) laissent penser que l'amplitude des ondes gravitationnelles détectables avec les instruments actuels ne dépasse pas $h = 10^{-21}$. La détection d'une telle variation relative de longueur est un véritable défi. En effet, même avec des interféromètres de plusieurs kilomètres de long, comme Virgo ($L = 3\text{ km}$), la détection d'une onde gravitationnelle d'amplitude $h = 2\Delta L/L = 10^{-21}$ revient à mesurer une variation de longueur des bras ΔL de l'ordre de 10^{-18} m (un millièème de la taille d'un noyau atomique). Cela revient à mesurer la distance entre la Terre et le Soleil (150 millions de km) avec une précision de l'ordre de la taille d'un atome (10^{-10} m).

2.3.2 Bref historique des détecteurs interférométriques

Une méthode très précise pour mesurer des variations de distance est l'interférométrie. C'est donc assez naturellement que dès 1960, Joseph Weber, pionnier de la détection des ondes gravitationnelles par des barres résonnantes [32], s'intéresse aussi aux interféromètres [33]. Cependant, il ne concrétise pas son projet et, indépendamment, en 1962, Gertsenshtein et Pustovoit [34] proposent la possibilité d'une détection interférométrique des ondes gravitationnelles. Mais, il faudra attendre R. Weiss [35] et R. Forward, aux Etats-Unis, pour qu'en 1972 un premier prototype de détecteur interférométrique de 8.5 m voit le jour, avec une sensibilité de $h = 3 \times 10^{-16}$ entre 1 kHz et 3 kHz [36]. Cette sensibilité est comparable à celle des détecteurs à barre résonnante en fonctionnement à cette époque et ce nouveau détecteur ouvre considérablement la bande de fréquence accessible. Pour anecdote, l'analyse des données de ce premier détecteur interférométrique est faite... à l'oreille.

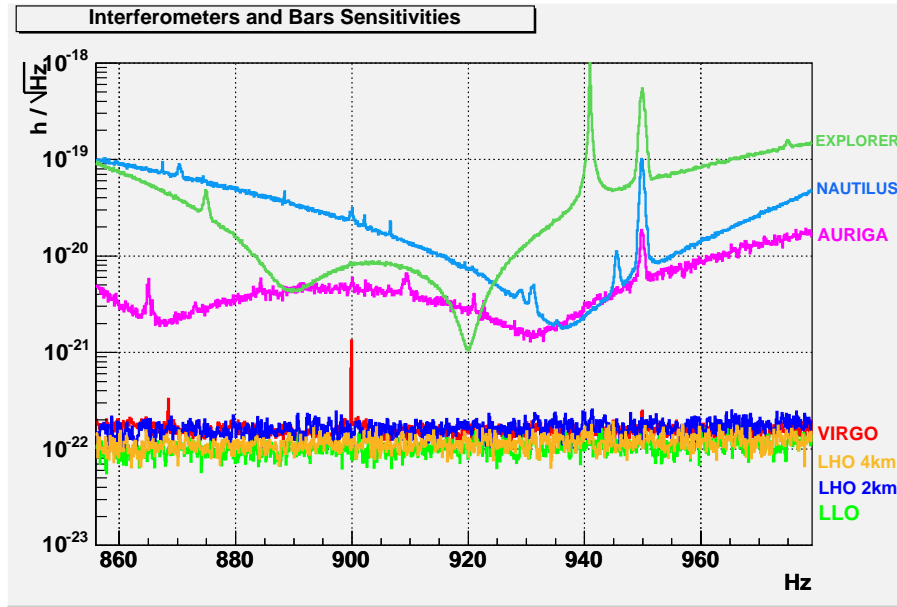


FIG. 2.2 – Sensibilités comparées des détecteurs interférométriques Virgo et LIGO (LHO 4km, LHO 2km, LLO) en 2007 et des détecteurs à barre résonnante Auriga, Nautilus et Explorer, dans la bande de fréquence où la sensibilité des détecteurs à barre est la meilleure. Ces courbes donnent en fonction de la fréquence une estimation de l'amplitude minimale que devrait avoir une onde gravitationnelle pour être détectable. On observe clairement que les détecteurs interférométriques sont désormais 10 fois plus sensibles que les détecteurs à barre résonnante.

Dans les années 1980, plusieurs prototypes de détecteur interférométrique sont construits en Europe et aux Etats-Unis. Ils sont tous de taille relativement réduites (entre 10 m et 40 m de long) mais ouvrent la voie pour les configurations optiques, les suspensions et les asservissements de futurs interféromètres plus sensibles.

Vers le milieu des années 1990, plusieurs interféromètres kilométriques voient le jour. Ils bénéficient des connaissances acquises sur les prototypes mais nécessitent aussi de nouvelles idées ou de nouvelles stratégies de contrôle des miroirs. La construction des détecteurs LIGO

(USA), TAMA (Japon), GEO (Allemagne) et Virgo (Italie) est aujourd'hui achevée et tous sont en phase de prise de données ou d'amélioration. Leur sensibilité est telle qu'ils peuvent mesurer des modifications de longueur inférieures à $10^{-18}m$ dans un domaine de fréquence entre 100 Hz et 5 kHz, et détecter ainsi des sources d'ondes gravitationnelles distantes de plusieurs Mégaparsecs. A ce jour, aucune onde gravitationnelle n'a encore été détectée.

A la suite des travaux de J. Weber et parallèlement au développement des détecteurs interférométriques, de nombreux détecteurs à barre résonnante ont été construits. Récemment encore, des détecteurs à barre résonnantes cryogéniques étaient en fonctionnement (Allegro, Niobe, Auriga, Nautilus, Explorer, etc...) [38]. Ils peuvent atteindre une sensibilité inférieure à $h = 10^{-20}/\sqrt{Hz}$ entre 850 Hz et 950 Hz. Toutefois, leur bande de fréquence accessible reste très faible par rapport à celle des interféromètres et leur sensibilité est désormais dépassée par les détecteurs interférométriques de grande taille actuellement en fonctionnement (figure 2.2).

2.3.3 Les détecteurs interférométriques en 2007

Ces détecteurs ont été construits par des équipes américaines (LIGO), japonaises (TAMA300), germano-britanniques (GEO600) ou franco-italiennes (Virgo). Au cours des dix dernières années, ces équipes ont échangé les connaissances acquises au cours de la construction et de la mise au point de ces interféromètres géants.

LIGO¹ est un ensemble de 3 détecteurs : un interféromètre de 4 km situé à Livingston, en Louisiane et deux interféromètres (4 km et 2 km) construit à Hanford, dans l'état de Washington. Comme nous le verrons par la suite, plusieurs interféromètres de sensibilités comparables et fonctionnant en coïncidence est un atout majeur pour détecter et localiser une source d'ondes gravitationnelles. La configuration optique de chacun de ces trois interféromètres est essentiellement identique à celle de Virgo. Dès l'automne 2002, LIGO a tenté une première prise de données scientifique (S1) avec une sensibilité 40 à 100 fois moins bonne que la sensibilité nominale. En 2004, ont été publiés dans Physical Review D les premiers résultats de l'analyse des données de S1. En mars 2005, après 3 années de "commissioning", LIGO avait quasiment atteint sa sensibilité nominale. Le 4 novembre 2005, les trois interféromètres ont commencé une longue prise de données scientifique (run S5) qui devrait se terminer en septembre 2007. Dès 1997 a été fondée la LIGO Scientific Collaboration (LSC) afin d'organiser la recherche scientifique dans le domaine de la détection interférométrique des ondes gravitationnelles. Cette communauté compte actuellement environ 450 physiciens venus de LIGO, de GEO600 et de TAMA300. Les derniers résultats publiés par la LSC concernent le run S3 (du 1er novembre 2003 au 9 janvier 2004) et fournissent des limites sur la détectabilité des signaux impulsifs [39]. Les préparatifs pour un détecteur amélioré "Enhanced LIGO" puis d'un détecteur 10 fois plus sensible, "Advanced LIGO", sont déjà en cours. Le commissioning de "Enhanced LIGO" devrait commencer dès 2008-2009.

TAMA300² est un interféromètre de 300 m de long situé dans la banlieue de Tokyo. Sa configuration optique est pour l'essentiel identique à celle de Virgo. L'expérience TAMA a réalisé ses prises de données entre 2001 et 2005 [40] et, même si la sensibilité de son détecteur est désormais dépassée par celles de LIGO et Virgo, elle a permis de développer, entre autres, des

¹<http://www.ligo.caltech.edu>

²<http://tamago.mtk.nao.ac.jp>

stratégies de verrouillage d'un interféromètre recyclé et de préparer le projet d'un interféromètre kilométrique : LCGT. Ce projet n'est pas encore financé mais un prototype souterrain, CLIO, est déjà très avancé.

GEO600³ est un interféromètre de 600 m de long situé près de Hanovre. Depuis 2003, GEO600 a réalisé plusieurs prises de données avec une sensibilité comparable à celle de TAMA. Plusieurs de ces prises de données ont été réalisées en coïncidence avec les runs de LIGO [41]. Depuis 2002, GEO fait partie de la LSC (LIGO Science Collaboration) et échange avec LIGO son expertise dans le domaine de l'optique et de l'analyse de données. Des échanges fructueux existent également avec Virgo, dans le cadre d'un futur deuxième interféromètre européen ou d'une amélioration du détecteur Virgo.

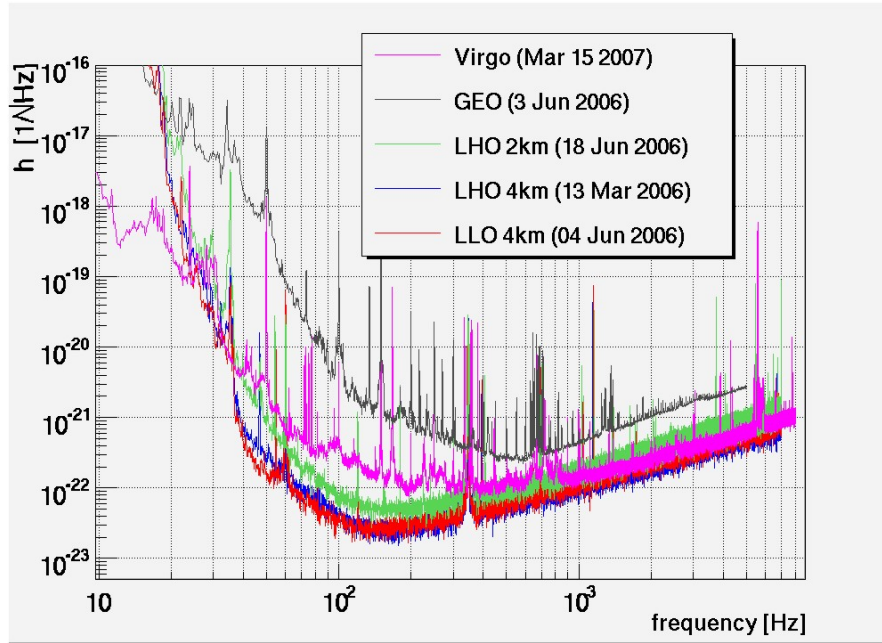


FIG. 2.3 – Sensibilités comparées des trois détecteurs LIGO, Virgo et GEO600, sur la période 2006-2007. La courbe de sensibilité de chacun donne en fonction de la fréquence une estimation de l'amplitude minimale que devrait avoir une onde gravitationnelle pour être détectable.

Virgo⁴ est un interféromètre de 3 km de long situé dans la plaine de Cascina, à 15 km de Pise, en Italie. Sa construction a commencé en 1996 et sa phase de commissioning avec les deux bras complets a commencé en juillet 2003. Cette phase de commissioning s'achève actuellement mais avec une sensibilité différente de la sensibilité nominale : un facteur 2 reste à gagner entre 500 Hz et 10 kHz et un facteur de 3 à 100 entre 10 Hz et 500 Hz. Cette sensibilité a été toutefois jugée suffisante pour prévoir une prise de données scientifique commune avec LIGO entre mai 2007 et septembre 2007. Cette prise de données se fera dans le cadre d'un accord signé entre la LSC et Virgo qui prévoit l'échange de données et la création de groupes de travail et de comités communs dans le domaine de l'analyse, des publications ou des développements techniques pour les améliorations futures des détecteurs.

³<http://geo600.aei.mpg.de>

⁴<http://wwwcascina.virgo.infn.it>

La figure 2.3 montre les sensibilités comparées de LIGO, Virgo et GEO600. Elle montre notamment que le détecteur Virgo est de sensibilité comparable à celle de LIGO au-dessus de 500 Hz. Cette courbe permet d'estimer la distance maximale (horizon) à laquelle peut être détectée une coalescence de deux étoiles à neutrons de $1.4 M_{\odot}$.

$$D_{horizon} \text{ (en Mpc)} = \frac{1}{2} \int_{\nu_{min}}^{\nu_{max}} \frac{|\tilde{h}(\nu)|^2}{S_h(\nu)} d\nu \quad (2.3)$$

où $\tilde{h}(\nu)$ est la densité spectrale du signal d'onde gravitationnelle d'une coalescence binaire à 1 Mpc et $S_h(\nu)$ est le module au carré de la densité spectrale du bruit du détecteur calibré en valeur h (courbe de sensibilité). Si l'on choisi $\nu_{min} = 20 \text{ Hz}$ et $\nu_{max} = 2000 \text{ Hz}$ (bande de fréquence de détection des coalescences binaires mais aussi bande de fréquence où Virgo n'a pas encore atteint sa sensibilité nominale) on observe qu'en mars 2007, l'horizon de Virgo était d'environ 3 Mpc et celui de LIGO d'environ 15 Mpc. A court terme se dessine toutefois un avenir commun entre LIGO, GEO600 et Virgo. Ces expériences vont prendre des données en coïncidence, réaliser des analyses communes et publier des résultats en commun.

2.3.4 L'avenir de la détection des ondes gravitationnelles

Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.2, le nombre estimé de coalescences binaires par an et par galaxie est très faible et très incertain. Pour les détecteurs actuellement en fonctionnement avec un horizon pouvant aller jusqu'à 15 Mpc, cela signifie moins de 0.7 coalescence binaire détectable par an. Augmenter les chances de détection, voire commencer une véritable astronomie gravitationnelle passe donc par une amélioration de la sensibilité des détecteurs. Gagner un facteur 10 en sensibilité permettrait de gagner un facteur 1000 sur le nombre de sources détectables. Les collaborations LIGO, GEO600 et Virgo travaillent de plus en plus étroitement et envisagent dans les prochaines années d'améliorer notablement leurs interféromètres afin de les rendre dix fois plus sensibles sur quasiment toute la bande de fréquence accessible (10 Hz à 10 kHz). Ces détecteurs, qui seront construits au cours de la prochaine décennie, pourront détecter des coalescences binaires jusqu'à plus de 100 Mpc, c'est à dire dans un volume incluant le super-amas de galaxies centré sur l'amas Virgo et contenant plusieurs milliers de galaxies. Ce qui devrait leur permettre de passer d'un taux de détection de 0.075 ± 0.06 événement par an (estimation actuelle pour Virgo et LIGO en sensibilité nominale) à un taux de 405 ± 325 événements par an [31].

Des mises en commun d'expertises et de nombreuses R&D (augmentation de la puissance du laser, réduction du bruit thermique des miroirs et de leurs suspensions, asservissements plus rapides et moins bruyants, isolations sismiques plus performantes...) ont déjà commencé, financées par la NSF pour LIGO et financées par le CNRS, l'INFN et la Communauté Européenne pour Virgo et GEO600. Ces R&D sont actuellement concentrées sur des détecteurs intermédiaires, "Enhanced LIGO" et "Virgo+", qui devraient entrer en fonctionnement avant 2011 avec une sensibilité améliorée d'au moins un facteur 2 par rapport aux détecteurs de 2006. A ces interféromètres améliorés succéderont Advanced LIGO et Advanced Virgo, des interféromètres dix fois plus sensibles qui devraient fournir, après 2013, les premières observations régulières d'ondes gravitationnelles, commençant ainsi une nouvelle astronomie : celle des ondes gravitationnelles. Ce seront en quelque sorte de nouveaux télescopes, fonctionnant en réseau, mais de résolution spatiale bien inférieure aux télescopes optiques. Leur grand avantage sera d'être

capables de "voir" à travers la matière galactique.

Un futur détecteur japonais LCGT¹ et un détecteur kilométrique australien, AIGO, sont également proposés. Mais leur financement n'est pas encore décidé. LCGT est un projet d'interféromètre de 3 km, qui prévoit d'être souterrain pour réduire le bruit sismique et d'utiliser la cryogénie pour réduire le bruit thermique des suspensions. Un prototype souterrain, CLIO, existe déjà dans la mine de Kamioka et les développements avancent rapidement (cavité cryogénique verrouillée). L'existence de LCGT et de AIGO renforcerait le réseau d'interféromètres donc la crédibilité d'une détection et la précision sur la localisation des sources.

Le projet d'un autre détecteur interférométrique de plusieurs kilomètres en Europe est actuellement discuté. Avec Virgo et LIGO, il permettrait une meilleure localisation des sources, une étude de la polarisation de l'onde gravitationnelle et une meilleure garantie de détection en coïncidence. Ce dernier point est très important. D'une part, parce qu'un détecteur interférométrique n'est quasiment pas directionnel et que trois détecteurs au moins sont donc nécessaires pour reconstruire la direction de la source puis tenter de travailler en coïncidence avec des télescopes optiques ou des détecteurs de neutrinos. D'autre part, parce que de nombreux signaux transitoires peuvent simuler des signaux d'ondes gravitationnelles et que la mise en coïncidence de détecteurs indépendants est cruciale pour réduire le taux de faux événements. Un détecteur supplémentaire est donc important, notamment parce que l'orientation des quatre détecteurs kilométriques actuels Virgo et LIGO n'optimise pas la détection en coïncidence [42].

Enfin, un projet international (USA et Europe) nommé LISA² est en cours de développement. Cet interféromètre triangulaire placé en orbite autour du soleil et dont les bras feraient 5 millions de kilomètres présente des difficultés techniques majeures mais possède l'avantage de s'affranchir du bruit sismique de la Terre. Cette caractéristique lui permettra de détecter des ondes gravitationnelles de fréquence comprises entre 1 mHz et 1 Hz et avec une sensibilité comparable à celle de Virgo et LIGO. Ce type de détecteur pourrait alors avoir accès à des systèmes binaires très massifs ou à des systèmes binaires encore loin de la coalescence finale, donc potentiellement plus nombreux dans la zone de détection. Le financement de LISA n'est pas encore acquis et la NASA et le CNES ne soutiennent actuellement que Lisa-PathFinder, un projet qui montrerait la faisabilité de LISA.

¹<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/gr/LCGT.html>

²<http://lisa.nasa.gov> , <http://lisa.gsfc.nasa.gov>

Chapitre 3

Le détecteur Virgo

Ce chapitre décrit le détecteur Virgo et ses performances actuelles (sensibilité et cycle utile). Après une brève description de l'interféromètre, je donnerai un aperçu des bruits stationnaires susceptibles de limiter sa sensibilité et des bruits transitoires qui peuvent réduire les capacités de détection. Seront également succinctement décrites les différentes boucles de contrôle qui maintiennent l'interféromètre sur son point de fonctionnement, les étapes de la procédure automatique de verrouillage de l'interféromètre et les différentes étapes du commissioning du détecteur depuis 2003. Tous ces points ont des liens étroits avec l'acquisition de données et la surveillance du détecteur décrites au chapitres 4 et 5.



FIG. 3.1 – *Vue aérienne du détecteur Virgo en 2004, dans la plaine de Cascina.*

3.1 Un interféromètre de 3 km

Virgo est un projet européen qui rassemble actuellement 5 laboratoires français, 7 laboratoires italiens et un laboratoire des Pays-Bas : Annecy (LAPP), Paris (ESPCI), Lyon (LMA), Nice (OCA), Orsay (LAL), Pise (INFN-Pise), Perouse (INFN-Perugia), Rome1 (INFN-Rome),

Naples (INFN-Napoli), Florence (INFN-Urbino), Rome2 (INFN-Tor Vegata), Amsterdam (NIKHEF). Le site du détecteur et ses infrastructures sont gérés par un consortium privé financé par le CNRS et l'INFN : le "European Gravitational Observatory" (EGO), qui a vu le jour en 2002. EGO a pour but de fournir un support au commissioning de Virgo (fonctionnement, maintenance, améliorations), de faire fonctionner un centre de calcul pour l'analyse de données sur le site et de promouvoir la R&D pour la détection des ondes gravitationnelles.

Le détecteur Virgo (figure 3.1) a été construit en Italie, sur la commune de Cascina, près de Pise (lat. : 43.63° Nord, long. : -10.5° Ouest). Les travaux de construction des bâtiments ont commencé en juin 1996, les premiers éléments du détecteur ont été installés à l'automne 1998 et la mise en place des bras de 3 km s'est terminée au cours de l'année 2003 (orientation des bras dans le sens inverse des aiguilles d'une montre à partir du Nord : 70.5° et -19.5°).

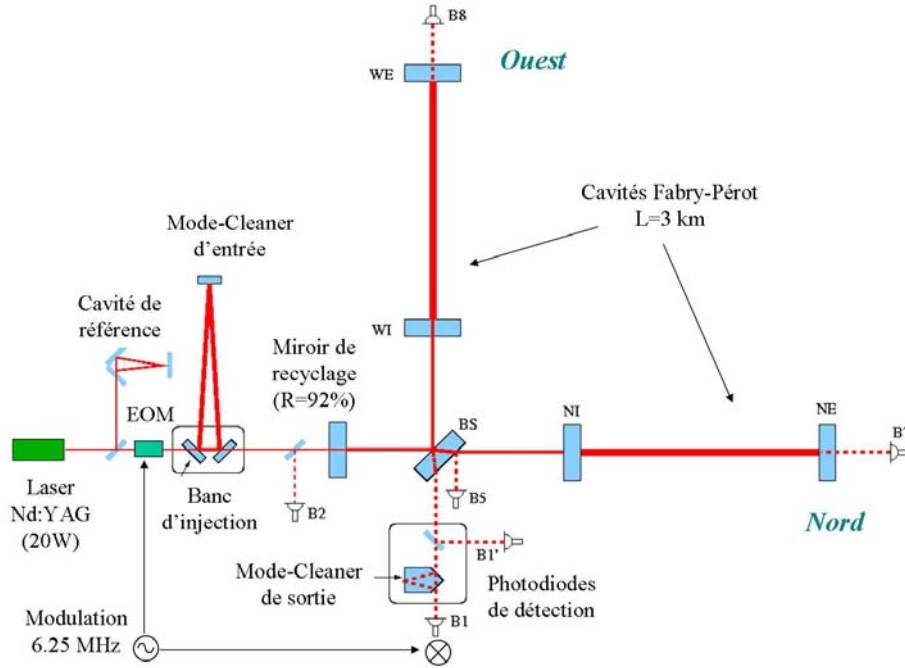


FIG. 3.2 – Configuration optique de Virgo.

Comme le montre la figure 3.2, Virgo est un interféromètre de Michelson utilisant un faisceau laser de 20 Watts en entrée et dont chacun des bras de 3 km contient une cavité Fabry-Perot. Ces cavités permettent d'augmenter la longueur effective des bras jusqu'à 100 km environ et d'améliorer proportionnellement la sensibilité du détecteur. L'interféromètre étant réglé sur la frange noire afin de minimiser le bruit de photons (fluctuation statistique sur le nombre de photons détectés), la plus grande partie de la puissance lumineuse est réfléchi vers le laser. Un miroir partiellement réfléchissant, dit de "recyclage", est inséré entre l'interféromètre et le laser. Il permet de recycler cette lumière et d'obtenir théoriquement une puissance effective de plus de 500 W dans l'interféromètre. Cette technique permet de réduire encore le bruit de photons, donc d'améliorer la sensibilité de l'interféromètre aux ondes gravitationnelles.

L'ensemble de l'interféromètre (y compris les bras de 3 km) est placé dans une enceinte à

vide et chaque miroir est isolé du sol par un système de suspension très élaboré qui assure, au-delà de 10 Hz une diminution du bruit sismique d'un facteur 10^{14} . Afin d'assurer une bonne stabilité en fréquence du laser, de garder l'interféromètre sur la frange noire, de garder les cavités Fabry-Perot et la cavité de recyclage résonnantes, de garder l'ensemble de l'interféromètre aligné ou de limiter les mouvements des miroirs à basse fréquence, un ensemble complexe de boucles de contrôle analogiques ou numériques a été mis en place, avec souvent un compromis à réaliser entre leur stabilité et leur niveau de bruit. Aujourd'hui encore, plusieurs améliorations sont en cours afin de réduire les bruits réintroduits par les boucles de contrôles et leur impact sur la sensibilité de Virgo.

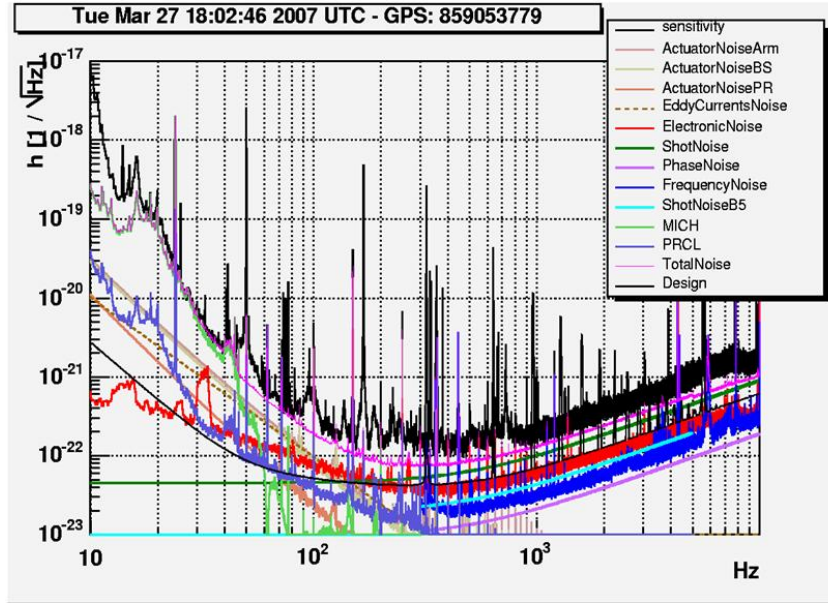


FIG. 3.3 – Sensibilité de l'interféromètre (densité spectrale du signal de frange noire calibrée en amplitude équivalente h) pendant une prise de données en février 2007. Les courbes superposées montrent les différents types de bruit identifiés comme pouvant contribuer à la courbe de sensibilité.

3.2 Le détecteur Virgo et ses principales sources de bruit

Virgo tente de détecter des ondes gravitationnelles dans un large domaine de fréquence entre 10 Hz et 10 kHz et avec une sensibilité maximale. Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, c'est un interféromètre de Michelson complexe comportant de nombreux éléments mécaniques, optiques ou électroniques et sa configuration est faite de plusieurs cavités optiques. Pour atteindre son but, Virgo doit utiliser de nombreuses boucles de contrôle pour asservir la longueur et l'alignement de ces cavités. Il doit aussi s'affranchir autant que possible des différentes sources de bruit qui sont à l'origine de fluctuations de longueur ou d'alignement des cavités et qui pourraient limiter sa sensibilité. Certaines de ces sources sont environnementales (bruit sismique, bruit acoustique...), ou propres au détecteur (bruit de photons, bruits électroniques des photodiodes, bruit en fréquence du laser, bruits thermiques des miroirs ou de leur suspensions...). De plus, chacun de ces bruits peut éventuellement se propager dans les boucles d'asservissement

de l'interféromètre, ce qui rend leur origine véritable plus difficile à déterminer.

A haute fréquence (entre 200 Hz et 10 kHz) le bruit dominant est le bruit de photons (fluctuation statistique du nombre de photons détectés). A basse fréquence (en-deçà de 10 Hz) le bruit dominant est le bruit sismique qui fait bouger le système de suspension des miroirs de l'interféromètre. Entre 10 Hz et 200 Hz, le bruit dominant est théoriquement le bruit thermique des miroirs et de leurs suspensions. Toutefois, Virgo est actuellement limité dans cette zone par divers bruits environnementaux ou instrumentaux réintroduits à travers les asservissements de l'interféromètre. La figure 3.3 montre la sensibilité actuelle de l'interféromètre et les différentes contributions des sources de bruits qui ont pu être identifiées à ce jour [43]. Certaines de ces sources de bruit sont détaillées ci-dessous.

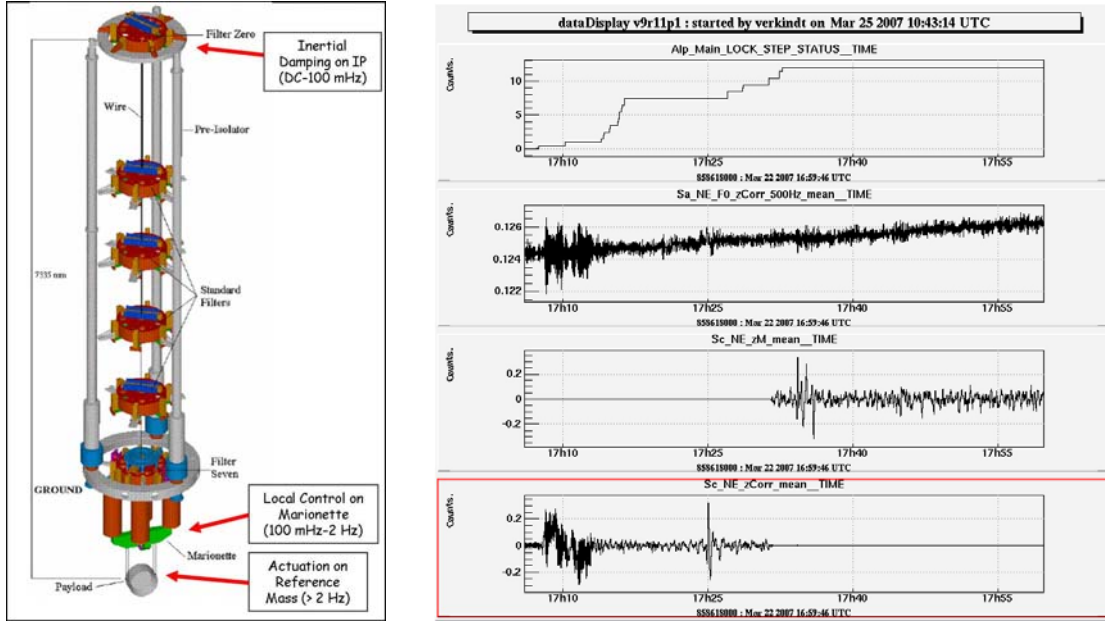


FIG. 3.4 – A gauche : schéma du système de suspension des miroirs de Virgo, avec les différents niveaux de contrôle par les asservissements en fonction de la bande de fréquence considérée. A droite : les signaux de contrôle envoyés aux différents étages du système de suspension. On peut observer qu'à partir d'une certaine étape de la procédure automatique de verrouillage de l'interféromètre ($Alp_Main_LOCK_STEP_STATUS = 12$) le signal contrôlant le mouvement longitudinal du miroir ($zCorr$) est diminué, tandis que le signal contrôlant la partie intermédiaire de la suspension (zM) est augmenté. Cette hiérarchisation du contrôle des miroirs permet de réduire le bruit introduit par ce contrôle en réduisant la dynamique des actionneurs sur les miroirs.

3.2.1 Bruit sismique

Les micro-mouvements du sol (sismicité naturelle, vent, vagues, activité humaine) peuvent provoquer, dans la bande de détection de Virgo (10 Hz à 10 kHz), des variations d'alignement importantes ou des variations de longueur des cavités de plusieurs centièmes de microns, très supérieures à celles provoquées par une onde gravitationnelle. Chaque miroir de l'interféromètre est donc suspendu à un superatténuateur qui réduit d'un facteur 10^{14} tout mouvement vertical

de fréquence supérieure à 10 Hz. Ce système passif est complété par un ensemble de boucles de contrôle qui permettent de réduire les mouvements basses fréquences du haut de la suspension et de réduire le mouvement des miroirs jusqu'à un rms de l'ordre de 10^{-12} m. La figure 3.4 montre les niveaux de contrôles des suspensions selon l'amplitude et la fréquence du signal de correction ainsi que les signaux utilisés à ces trois niveaux. Sans ces contrôles actifs, le superatténuateur ne serait pas suffisant pour permettre le verrouillage de l'interféromètre sur son point de fonctionnement.

3.2.2 Bruits thermiques

L'agitation thermique excitant les résonances des miroirs ou de leurs fils de suspensions est un facteur limitant la sensibilité de l'interféromètre. Les matériaux et les dimensions des miroirs et des fils de suspensions sont choisis pour avoir de grands facteurs de qualité donc pour minimiser le bruit thermique hors résonances et pour diminuer la largeur de ces résonances. La bande de fréquence où ce bruit est théoriquement dominant s'étend de 10 Hz à 300 Hz environ.

3.2.3 Bruit de photons

Plus le contraste de la frange noire est important, meilleure est la sensibilité de l'interféromètre. Ceci est lié au bruit de photons qui est d'autant plus important que la puissance lumineuse détectée est importante. L'amélioration du contraste des franges d'interférence est réalisée grâce à un mode-cleaner de sortie isolé sismiquement et constitué d'une cavité monolithique dont la longueur est contrôlée par effet Peltier. La bande de fréquence où ce bruit est dominant s'étend de 300 Hz à 10000 Hz.

3.2.4 Bruits environnementaux

Pour se protéger des particules de poussière qui peuvent diffuser le faisceau laser, des fluctuations d'indice de l'air qui peuvent modifier la phase du faisceau et du bruit acoustique qui peut faire bouger les miroirs, les principaux éléments de l'interféromètre (miroirs, séparatrice, banc d'injection, banc de détection) sont placés dans un vide inférieur à 10^{-8} mbar. De plus, les différents bancs optiques qui ne sont pas placés sous vide sont des lieux fermés qui disposent d'une isolation sismique et acoustique minimum. Malgré ces protections, le bruit acoustique est présent dans le signal de frange noire, notamment parce qu'il est introduit dans l'interféromètre au travers de faisceaux secondaires diffusés par certains éléments des bancs optiques ou au travers d'éléments qui ne sont pas isolés sismiquement et acoustiquement. Des bruits environnementaux d'origine électromagnétique (alimentation électrique, pompes à vide, climatisation, etc...) peuvent également être présents dans le signal de frange noire et limiter la sensibilité de l'interféromètre. Tous ces bruits environnementaux dominent actuellement le bruit thermique et le bruit de photons dans une bande de fréquence s'étendant de 50 Hz à 1000 Hz environ.

3.2.5 Bruits du système d'injection

Les fluctuations de fréquence du laser peuvent générer des fluctuations de phase à la sortie de l'interféromètre si les chemins optiques dans les deux bras ne sont pas parfaitement identiques. Avant d'être injecté dans l'interféromètre, le faisceau laser passe dans une cavité Mode-Cleaner de 144 m maintenue résonnante sur le mode TEM00 et jouant le rôle de filtre passe-bas. Mais pour limiter suffisamment le bruit en fréquence il est nécessaire d'asservir le laser sur l'interféromètre,

par exemple sur le faisceau B5 renvoyé par le bras Nord de l'interféromètre (figure 3.2). Les fluctuations de puissance du faisceau laser injecté se traduisent par des fluctuations de phase en sortie de l'interféromètre donc une dégradation de sa sensibilité. Ces fluctuations de puissance peuvent provenir du laser lui-même ou des fluctuations d'alignement du faisceau avec le Mode-Cleaner d'entrée. Elles sont réduites grâce à un asservissement du laser sur la puissance du faisceau en sortie du Mode-Cleaner.

3.2.6 Bruits de contrôle

Les boucles qui contrôlent la fréquence du laser, qui stabilisent l'alignement des miroirs, qui gardent les cavités résonnantes ou maintiennent l'interféromètre en frange noire utilisent des actionneurs, des photodiodes et une électronique analogique ou numérique qui peuvent réintroduire du bruit de photons, du bruit électronique ou du bruit environnemental dans les mouvements des miroirs. Le choix de l'électronique de détection et des actionneurs est par conséquent crucial. Une grande dynamique, une grande précision et un échantillonnage rapide sont les trois principaux facteurs du choix des capteurs. Un faible bruit et un gain élevé sont nécessaires côtés actionneurs. Ces bruits de contrôle ne sont pas négligeables et font partie des principales limitations actuelles de la sensibilité de Virgo. Ils dominent actuellement le bruit thermique dans la bande de fréquence s'étendant de 10 Hz à 100 Hz environ.

3.2.7 Bruits transitoires

En plus de ces bruits permanents, toutes sortes de bruits transitoires, d'origine instrumentale ou environnementale, peuvent affecter la sensibilité du détecteur et surtout l'analyse des données, en simulant des signaux d'ondes gravitationnelles. Par exemple, la détection du faisceau laser en sortie de l'interféromètre est réalisée par un ensemble de photodiodes situées sur un banc optique, à l'extérieur des enceintes à vide. Les signaux de ces photodiodes sont traités par une électronique analogique puis numérisés par des ADC 16 bits pour être envoyés vers l'acquisition de données et vers les asservissements de l'interféromètre. Sur ces signaux, des bruits transitoires ont été observés pendant le commissioning, avec des origines diverses : numérisation défectueuse, bruit sismique ou électromagnétique dû à l'utilisation de picomoteurs pour réaligner les optiques de sortie sur le faisceau, poussières passant dans le faisceau. L'étude de ces bruits transitoires fera l'objet du chapitre 6.

3.3 Les contrôles de l'interféromètre et l'automatisation de la procédure de verrouillage

De nombreuses boucles de contrôles sont utilisées dans Virgo pour maintenir l'interféromètre sur son point de fonctionnement. Ces asservissements ne sont pas indépendants les uns des autres. C'est ce qui rend complexe le verrouillage de l'interféromètre mais aussi la recherche des sources de bruit limitant la sensibilité. Les principales boucles de contrôles sont les suivantes :

- Contrôle des cavités Fabry-Perot qui sont maintenues résonnantes sur le laser.
- Contrôle du Michelson formé par la séparatrice et les miroirs d'entrée des cavités Fabry-Perot.
- Contrôle de l'interférence entre les deux bras de 3 km qui est maintenue sur la frange noire.
- Contrôle de la cavité de Recyclage qui est maintenue résonnante sur le laser.

- Contrôle de la fréquence du laser qui est asservi à basse fréquence sur une cavité de référence et à haute fréquence sur l'interféromètre.
- Contrôles de l'alignement des cavités Fabry-Perot, de la cavité de recyclage, de la séparatrice, etc...
- Contrôle des fluctuations de puissance du laser.
- Contrôle de l'alignement du faisceau sur le Mode-Cleaner d'entrée.
- Contrôle du Mode-Cleaner d'entrée qui est maintenu résonnant sur le mode TEM00 du faisceau laser.
- Contrôle de l'alignement du Mode-Cleaner de sortie sur le faisceau.
- Contrôle du Mode-Cleaner de sortie qui est maintenu résonnant sur le mode TEM00 du faisceau laser.

Le verrouillage de l'interféromètre consiste avant tout à acquérir et à maintenir le contrôle des longueurs des différentes cavités (cavités Fabry-Perot et cavité de recyclage) et le contrôle de l'interféromètre de Michelson. Dans la configuration complète (Michelson recyclé) les deux cavités Fabry-Perot et la cavité de recyclage doivent être maintenues à la résonance et le Michelson doit être maintenu sur la frange noire. Les longueurs doivent être contrôlées avec une précision de l'ordre de 10^{-12} m. De même l'alignement global de l'interféromètre doit être stabilisé avec une grande précision (de l'ordre de 10^{-9} rad) pour garantir la stabilité des autres boucles de contrôle.

L'ensemble de ces contrôles implique de nombreux signaux donc, comme nous le verrons au chapitre 4, une augmentation du flux enregistré par l'acquisition de données. La complexité de leur verrouillage implique également la mise en place d'une procédure de verrouillage de tous ces asservissements et un système de surveillance du détecteur qui puisse, comme nous le verrons au chapitre 5, s'adapter aux différentes étapes de cette procédure.

Toute une série d'actions est nécessaire pour passer d'un ensemble de miroirs libres à un interféromètre de Michelson devenu ultra-sensible grâce au verrouillage des boucles de contrôle citées précédemment. Cette série d'actions est ce que l'on appelle la procédure de verrouillage. Depuis 2005, cette procédure est automatisée grâce à un outil logiciel (Alp) développé au LAPP, qui, par étapes successives, mène le verrouillage de l'interféromètre jusqu'à un point de fonctionnement stable appelé "Science Mode". Ces étapes sont numérotées de 1 à 15 par une variable du système d'automatisation (Alp_Main_LOCK_STEP_STATUS). parmi celles-ci, les étapes essentielles sont les suivantes :

- **Etape 1** : les miroirs sont pré-alignés (sauf le miroir de recyclage), les cavités Fabry-Perot sont verrouillées et l'interféromètre est verrouillé en frange grise.
- **Etape 4** : le miroir de recyclage est aligné et la cavité de recyclage est verrouillée. La puissance lumineuse sur la séparatrice passe alors à plusieurs centaines de Watts.
- **Etape 8** : l'interféromètre est verrouillé sur la frange noire et le contrôle global de l'alignement est activé.
- **Etape 10** : le Mode-Cleaner de sortie est verrouillé sur le mode TEM00 du faisceau laser et le contrôle de la frange noire passe de la photodiode B1p à la photodiode B1 (voir figure 3.2).
- **Etape 12** : le contrôle des effets de marée est activé, ainsi que la réallocation des contrôles sur la partie intermédiaire des suspensions (voir figure 3.4).

- **Etape 15** : la réduction des bruits de contrôle est activée et des signaux permanents sont injectés dans le contrôle des miroirs afin de permettre la calibration en valeurs h du signal de frange noire.

3.4 Les performances du détecteur Virgo en 2007 : stabilité et sensibilité

Les bruits fondamentaux (bruit thermique, bruit de photons, bruit sismique), les bruits de contrôle ou les bruits environnementaux limitent la sensibilité du détecteur ou la stabilité de ses asservissements. Cette limitation des performances du détecteur peut être résumée par deux variables : le cycle utile du verrouillage de l'interféromètre et la courbe de sensibilité.

La courbe de sensibilité (figure 3.3) est une densité spectrale qui exprime les variations relatives de longueur des bras $h = \delta L / L$ en fonction de la fréquence, où $L = 3$ km est la longueur des bras et δL représente la différence de longueur entre les deux bras. Elle est appelée courbe de sensibilité du détecteur car elle permet de connaître à tout instant la limite de détection d'une onde gravitationnelle. Cette courbe, obtenue grâce au système de calibration de l'interféromètre [46], représente l'ensemble des bruits instrumentaux ou environnementaux qui limitent la détection.

Dans une première configuration, dite CITF, au mois de juillet 2002, le détecteur Virgo a réalisé une prise de données où furent mesurées des variations de longueurs des bras de l'ordre $10^{-13} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ à 10 Hz et de l'ordre de $10^{-16} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ vers 500 Hz. La figure 3.3 montre la courbe de sensibilité obtenue au mois de mars 2007. Cette fois, les variations de longueurs des bras sont de l'ordre $3.10^{-14} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($h \simeq 10^{-17} / \sqrt{\text{Hz}}$) à 10 Hz et de l'ordre de $3.10^{-19} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($h \simeq 10^{-22} / \sqrt{\text{Hz}}$) autour de 500 Hz.

L'intégration de la courbe de sensibilité (ou plutôt de son inverse) fournit un estimateur de la sensibilité globale de l'interféromètre. Il est remplacée par un estimateur équivalent, l'horizon défini par l'équation 2.3, qui représente la distance maximale à laquelle Virgo peut théoriquement détecter une coalescence binaire de deux étoiles à neutrons de 1.4 masses solaires. Au mois de mars 2007, l'horizon de Virgo était égal à 2.8 Mpc.

L'autre variable importante est la stabilité. Virgo doit être un détecteur non seulement très sensible mais aussi très stable et doit rester verrouillé 24h sur 24h afin de ne pas manquer d'événement astrophysique rare. Le travail de commissioning a donc porté non seulement sur l'amélioration de la sensibilité mais aussi sur la robustesse de l'ensemble des asservissements et sur l'automatisation des procédures de verrouillage afin d'optimiser le cycle utile de l'interféromètre. Durant les différentes prises de données, ce cycle utile a été maintenu entre 70% et 90%. La courbe 3.5 montre la très bonne stabilité du verrouillage de l'interféromètre obtenue pendant la prise de données WSR8, du 9 au 12 février 2007. Malgré tout, aujourd'hui encore, des améliorations sont envisagées par exemple sur les capteurs utilisés dans les asservissements des suspensions afin de rendre l'interféromètre plus robuste face aux secousses sismiques ou face à la sismicité due aux conditions climatiques.

Cette sensibilité et cette stabilité sont le fruit d'une longue période de commissioning du détecteur (décrite au paragraphe suivant), d'une traque incessante des sources de bruit et d'une automatisation complète de la procédure de verrouillage et d'alignement de l'interféromètre.

J'ai participé en partie à ce long et patient travail, notamment en créant des outils logiciels qui ont facilité les développements et les réglages sur l'interféromètre et qui ont contribué à l'analyse du comportement du détecteur et des bruits limitant sa sensibilité.

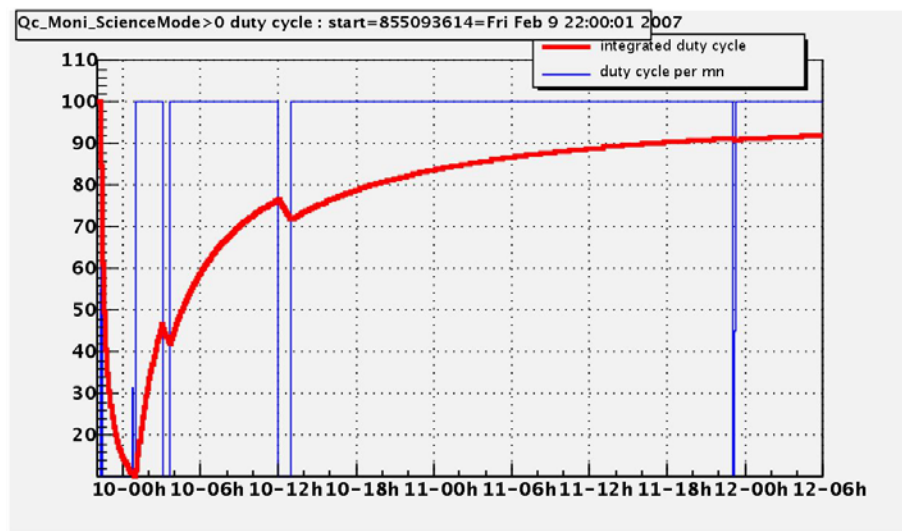


FIG. 3.5 – Cycle utile de l'interféromètre verrouillé pendant une prise de données de 3 jours en février 2007. Le détecteur est resté verrouillé en sensibilité maximale pendant plusieurs heures consécutives, avec au final un cycle utile de 90% sur 3 jours.

3.5 Commissioning de l'interféromètre

La construction de Virgo a commencé par la partie centrale qui abritait un interféromètre de Michelson recyclé de 6 mètres de long (CITF), sans cavités Fabry-Perot. La phase de mise au point, ou "commissioning", du CITF [44] a duré environ 18 mois, de février 2001 à juillet 2002, ponctuée de cinq prises de données techniques E0 à E4, avant de laisser place à l'installation et au commissioning du détecteur Virgo complet. Comme nous le verrons au chapitre 6, ces prises de données ont été une première occasion d'étudier le bruit du détecteur et de corriger quelques dysfonctionnements.

Le commissioning de Virgo [45] a débuté en septembre 2003 et se termine actuellement. Il poursuivait deux buts complémentaires : obtenir un détecteur aussi sensible que possible et obtenir un verrouillage de l'interféromètre aussi stable que possible. Cela consiste avant tout à acquérir et à maintenir le contrôle des longueurs des cavités décrits au paragraphe 3.3.

A chaque étape du commissioning, une prise de données de quelques jours a eu lieu avec pour but le fonctionnement de l'interféromètre dans une nouvelle configuration améliorée, un test de la stabilité du verrouillage sur de longues périodes et l'étude de la propagation des bruits instrumentaux dans l'interféromètre verrouillé de façon stable. De plus, au début et à la fin de ces prises de données, des signaux simulant un signal d'onde gravitationnelle ont été injectés au niveau des bobines qui contrôlent les mouvements longitudinaux des miroirs, afin de tester l'efficacité des algorithmes d'analyse de données.

Plusieurs de ces prises de données ont eu lieu depuis le début du commissioning de Virgo. La Figure 3.6 montre l'évolution de la sensibilité au cours du commissioning ainsi que la sensibilité prévue pour Virgo lors de sa conception (sensibilité nominale).

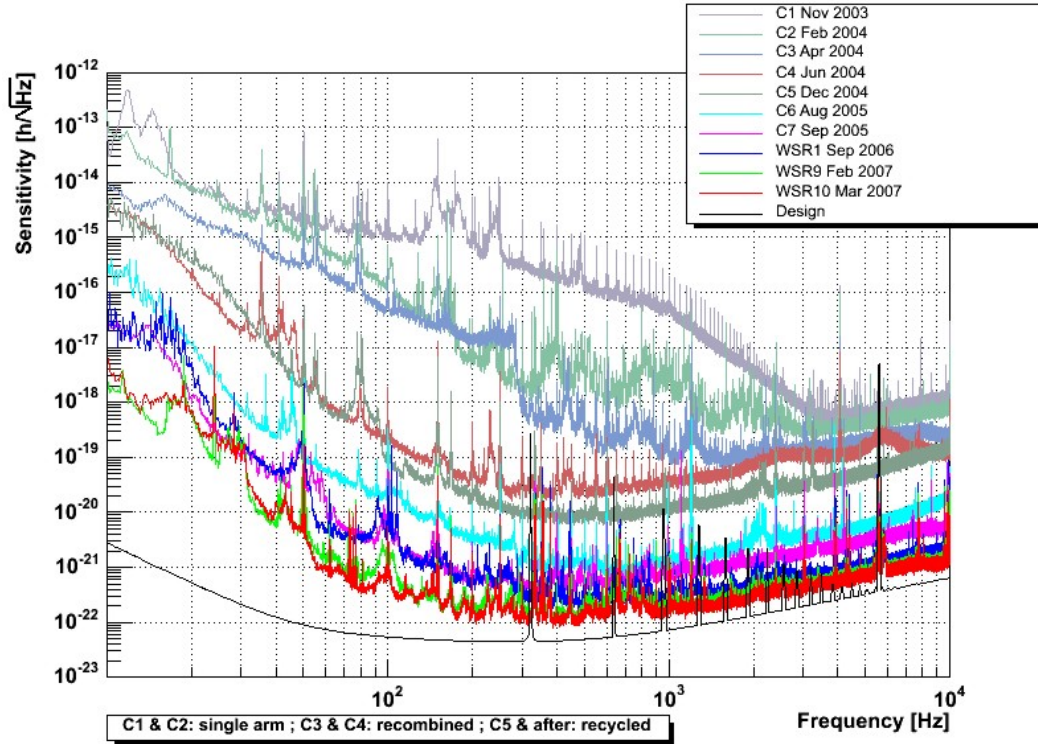


FIG. 3.6 – Sensibilité de Virgo obtenue lors des prises de données de commissioning (h représente la variation de longueur relative des bras de l'interféromètre). La puissance incidente sur l'interféromètre était d'environ 8 Watts de C1 à C4 (configuration cavité simple pour C1 et C2, michelson simple pour C3 et C4) et seulement 0.8 Watts de C5 à C7 (configuration Michelson recyclé). La puissance est à nouveau de 8 Watts pour WSR1 (configuration Michelson recyclé et modification du système d'injection). La sensibilité de "design" est donnée pour une puissance incidente de 10 Watts.

- C1 (novembre 2003) : verrouillage d'une cavité Fabry-Perot
- C2 (février 2004) : verrouillage des deux cavités Fabry-Perot (alternativement)
- C3 (avril 2004) : verrouillage d'une cavité Fabry-Perot puis du Michelson simple
- C4 (juin 2004) : verrouillage du Michelson simple
- C5 (décembre 2004) : verrouillage du Michelson simple puis du Michelson recyclé (Virgo complet)
- C6 (août 2005) : verrouillage du Michelson recyclé (Virgo complet)
- C7 (septembre 2005) : verrouillage du Michelson recyclé, amélioration du système d'alignement (Virgo complet)
- WSR1 (septembre 2006) : nouveau banc d'injection, nouveau miroir du mode-cleaner d'entrée, nouveau miroir de recyclage.
- WSR2 (septembre 2006) : amélioration du système d'alignement automatique, réduction du bruit acoustique sur le banc laser.

- WSR5 (novembre 2006) : contrôle global de l’alignement à basse fréquence, réduction du bruit dû à l’alignement du banc de détection.
- WSR7 (janvier 2007) : réduction du bruit acoustique, amélioration du contrôle des miroirs et de l’alignement automatique.
- WSR8 (janvier 2007) : réduction du bruit acoustique et de la lumière diffusée au niveau des bancs optiques de détection.
- WSR9 (février 2007) : prise de données complètement automatisée, 55h de verrouillage en continu.
- WSR10 (mars 2007) : réduction des bruits environnementaux, diminution des bruits de contrôle des miroirs et utilisation d’une fréquence de modulation supplémentaire pour l’alignement automatique.

L’analyse de chaque run a permis d’identifier les sources de bruit limitant la sensibilité. Entre chaque prise de données, les modifications nécessaires ont été apportées et de nouveaux systèmes de contrôle ont été implémentés afin d’améliorer la stabilité de l’interféromètre et sa sensibilité. Ces travaux d’analyse et d’amélioration de l’interféromètre avaient besoin d’une acquisition de données stable et performante qui enregistre en permanence tous les signaux utiles, notamment les signaux utilisés dans les boucles de contrôle de l’interféromètre. Comme nous le verrons au chapitre 4, ces conditions ont été remplies par l’acquisition de données pendant toute la durée du commissioning.

A partir du mois d’octobre 2004 s’est mise en place une automatisation des étapes du verrouillage complet de l’interféromètre. Cette automatisation utilise un outil logiciel développé au LAPP (Alp) qui lui-même utilise certains des outils développés pour l’acquisition de données. Cette automatisation a permis d’améliorer et d’accélérer considérablement les procédures de verrouillage de l’interféromètre.

3.6 Mes contributions au commissioning de l’interféromètre

De 1997 à 2002, j’ai participé à l’installation du CITF, à ses prises de données techniques et à l’étude du bruit du détecteur. Pendant cette période, j’ai activement participé à la conception, à la mise en place et à la mise en route de l’acquisition de données avant les premières prises de données du CITF. Jusqu’en 2002, l’installation de l’acquisition de données et les tests de ses performances ont demandé une forte présence sur le site de l’expérience, au cours de laquelle mes activités variaient de l’installation de câbles BNC à la conception de logiciels pour la collection de données.

Pendant l’installation du CITF et de son acquisition de données, est apparu rapidement un besoin important : la visualisation en ligne des données. J’ai donc conçu et réalisé un logiciel, le "dataDisplay", qui permet la visualisation en ligne des différents signaux qui aident à comprendre l’état de l’interféromètre. Le "dataDisplay" fut un des premiers outils utilisés pour le commissioning et l’analyse des données. Il est devenu aujourd’hui un outil standard de la collaboration Virgo, utilisé régulièrement dans ces deux domaines.

De 2002 à 2006, j’ai participé à l’installation de Virgo et à ses prises de données de "commissioning". En parallèle, j’ai amélioré ou mis en place plusieurs outils logiciels importants pour

le commissioning (dataDisplay et spectrogrammes en ligne) et j'ai participé à l'amélioration des performances de l'acquisition de données. J'ai, de plus, réalisé l'installation de la surveillance en ligne du détecteur et conçu pour cela des outils logiciels permettant de configurer facilement les algorithmes associés ainsi que la qualification des données (chapitre 5).

Je me suis par ailleurs intéressé à l'analyse des données des runs techniques du CITF, notamment à la non-stationnarité du bruit et à la recherche de signaux transitoires, ou "glitches", dans les différents signaux de l'interféromètre. Puis, dans la continuité de ce travail, j'ai réalisé l'installation des algorithmes de surveillance en ligne du bruit du détecteur, notamment pour la détection de ces signaux transitoires (chapitre 6).

Chapitre 4

Le système d'acquisition de données de Virgo

4.1 Cadre général

Le détecteur Virgo est un interféromètre de 3 kilomètres de long dont la stabilité repose sur de nombreuses boucles d'asservissement assurant le contrôle des longueurs des cavités ou le contrôle de l'alignement. Outre le signal de frange noire en sortie de l'interféromètre, de nombreux signaux entrant en jeu dans le contrôle du détecteur ou la surveillance de son environnement doivent être enregistrés. Cela implique des contraintes fortes sur l'acquisition de données : elle doit être synchronisée sur des distances kilométriques et doit pouvoir gérer un flux de données de plusieurs Mégaoctets par seconde.

L'équipe du LAPP responsable de mettre au point l'acquisition de données, avait, dès le départ, fait des choix qui se sont révélés efficaces vis à vis de ces contraintes :

- Une utilisation des outils standards disponibles (VME, PowerPC sous LynXOS, fibres optiques, réseau Ethernet, stations de travail sous Unix ou Linux).
- Une synchronisation centralisée avec un étiquetage des données par GPS et une distribution du signal de synchronisation par fibre optique.
- Une collection des données par fibre optique ou par Ethernet.
- Un format de données élaboré au LAPP en commun avec l'expérience américaine LIGO.

Lorsque je suis revenu dans l'expérience Virgo, en juin 1997, je me suis familiarisé avec le format de données en cours de développement (format "frame") [47] et j'ai contribué à l'amélioration de la librairie logicielle en langage C permettant la gestion de ce format de données [48]. En parallèle, j'ai contribué à la conception du système de synchronisation et du système de collection de données par fibres optiques qui étaient alors en cours de mise au point.

Je me suis ensuite intéressé à la collection, à travers le réseau Ethernet, des données au format "frame" (paragraphe 4.2). En collaboration avec Benoit Mours, j'ai développé un premier outil logiciel : la librairie "Fd" [49], qui utilise la librairie "Cm" [50] basée sur le protocole TCP/IP et qui gère le transfert des données au format "frame" sur le réseau Ethernet.

Puis, me basant sur le choix du réseau Ethernet et de PC Linux comme outils standards, j'ai développé un logiciel pour la collection de données provenant de différentes sources Ethernet. Cet outil, nommé "Main Frame Builder" est basé sur une mémoire partagée et a permis de construire l'acquisition de données (DAQ) comme une sorte de Lego, flexible et modifiable à volonté.

J'ai présenté la première configuration de l'acquisition de données basée sur ces outils logiciels ("Fd" et "Main Frame Builder"), à la Conférence de Moriond 1999 [53] et au Marcel Grossmann Meeting 2000 [54]. Dans les paragraphes suivants, sont décrits les éléments du DAQ sur lesquels j'ai travaillé puis les configurations de l'acquisition de données mises en place grâce à ces outils.

4.2 Le format "frame"

Avant de développer une acquisition de données, il est nécessaire de définir dans quel format seront propagées les données dans la chaîne d'acquisition et dans quel format elles seront sauvegardées. Depuis 1996, un format de données pour les détecteurs d'ondes gravitationnelles a été développé au LAPP, puis dans le cadre d'une collaboration entre les expériences VIRGO et LIGO : le format "frame" [47].

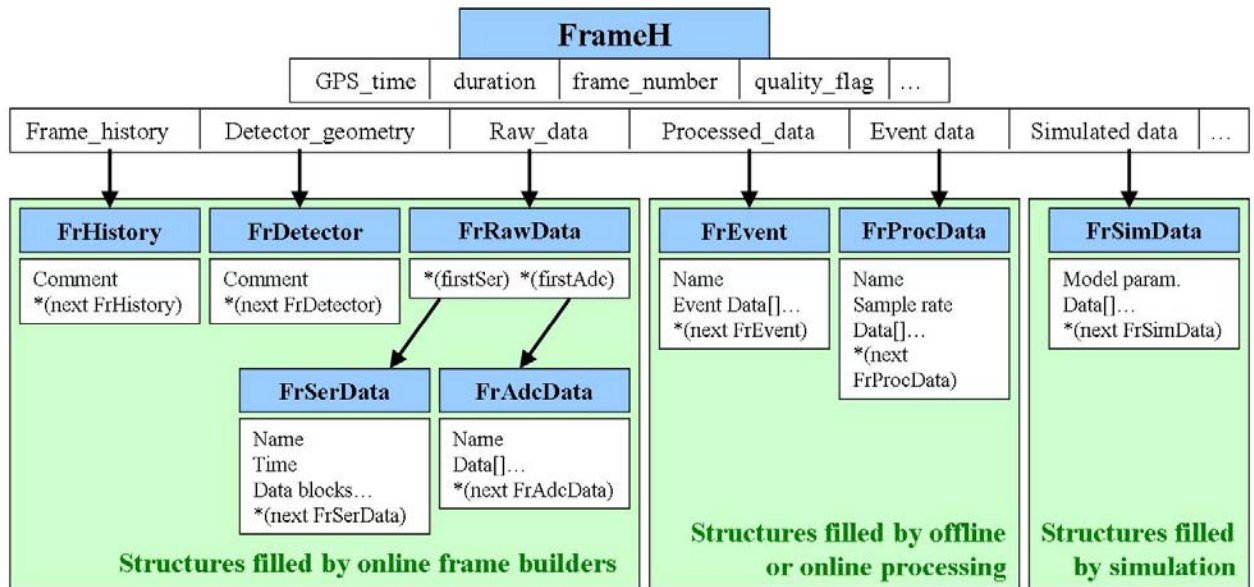


FIG. 4.1 – Architecture générale d'un "frame" de données.

Une expérience comme Virgo enregistre un flux de données continu dans le temps, à la différence d'une expérience de physique des particules classique qui enregistre des événements indépendants les uns des autres. Le format "frame" s'appuie sur un découpage du flux de données continu en tranches de temps de N secondes. Chacune de ces tranches de temps peut contenir plusieurs types de données différentes : les données brutes ("slow monitoring", "fast monitoring", photodiodes, asservissements, etc...), les données "processées", les données simulées ou les données événements créés par un algorithme d'analyse. Par abus de langage, nous appellerons

par la suite "frame" chacune de ces tranches de N secondes de données au format "frame".

Techniquement parlant, ce format de données se matérialise par un ensemble de structures C reliées à une structure centrale : le "frame header", qui est le point de départ de tout accès aux données et qui contient des informations de base comme le temps GPS, le numéro du frame ou la qualité des données. la figure 4.1 montre l'architecture générale d'un frame de données.

Une des structures intéressantes de ce format de données est la TOC (Table of Contents). Lors de l'écriture sur disque, les frames sont enregistrés séquentiellement et une TOC est écrite avant la fermeture du fichier afin de permettre ensuite un accès aléatoire rapide des frames et des données qu'ils contiennent.

4.3 La librairie Fd

Afin de faciliter l'échange des données au format "frame" entre les serveurs du DAQ, Virgo a développé la librairie "Fd" ("Frame distribution") qui gère les différents type d'entrées-sorties des données au format "frame". Elle repose sur l'utilisation de la mémoire partagée (paragraphe 4.4) et de la librairie Cm qui encapsule le protocole TCP/IP pour Ethernet. Grâce à "Fd" les frames peuvent être envoyés et reçus soit par le réseau Ethernet, soit par une mémoire partagée, soit par l'espace disque. J'ai ensuite créé "FdIOServer", sorte de "pièce de Lego" ou de "particule élémentaire" de l'acquisition de donnée. Dans ce petit élément de code C peut être glissé, par exemple, un algorithme de rééchantillonnage des données, un algorithme de surveillance en ligne du détecteur ou un algorithme de détection de glitches (voir figure 4.2).

Depuis septembre 2001, grâce à "Fd" et "FdIOServer", nous avons construit et fait évoluer la configuration de l'acquisition de données et plusieurs traitements en ligne. J'ai beaucoup contribué au développement de "Fd" et j'en assure encore aujourd'hui la gestion. Un autre élément qui participe à la configuration du DAQ et qui utilise la librairie "Fd" est le "main frame builder", qui assure la collection des données provenant de différentes sources Ethernet.

4.4 Le Main Frame Builder

Lors de la conception et de la mise en place de l'acquisition de données, j'ai eu la responsabilité de la collection finale des données, dernier étage de la chaîne d'acquisition avant traitement en ligne et enregistrement. J'ai conçu pour cela un programme, historiquement nommé "main frame builder" [52], qui permet de collecter de manière asynchrone des frames venus de différentes sources. Cette collection de frames se fait grâce à la librairie "Fd" décrite précédemment et par la gestion d'un buffer interne de frames. Au fur et à mesure de la réception des frames de différentes sources, le "main frame builder" les rassemblent en un seul frame contenant les données de l'ensemble de ces sources. Ce frame est ensuite écrit dans une mémoire partagée gérée par une librairie logicielle [51] que j'ai développée au sein de la librairie "Fd".

La mémoire partagée est une des fonctionnalités IPC (Inter-Process Communication) fournies par des systèmes comme Unix ou Linux. Elle permet la communication de données entre deux programmes indépendants, sur une même machine. La gestion de l'accès aux données est souvent confiée à un système de sémaphores (autre fonctionnalité IPC). Dans le contexte du main frame

builder, il m'a semblé plus simple de ne pas utiliser de sémaphore et de réaliser la gestion de la mémoire partagée grâce à deux compteurs *iwrite* et *iread* incrémentés à chaque écriture ou lecture d'un frame dans la mémoire partagée, la condition importante étant que la lecture d'un frame ne peut se faire que si le compteur *iread* est inférieur au compteur *iwrite*. Cette simple règle s'est avérée suffisante pour obtenir un "main frame builder" réalisant une gestion correcte des frames en mémoire partagée.

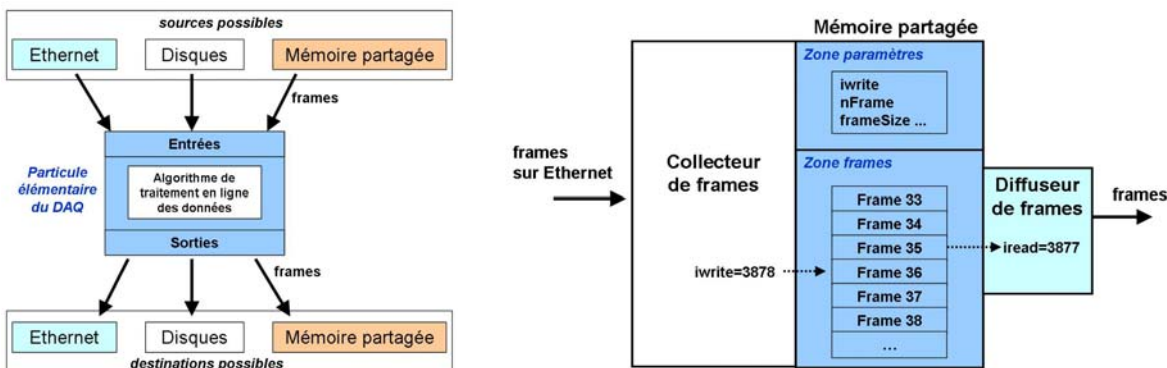


FIG. 4.2 – Figure de gauche : un élément de base de l'acquisition de données, fourni par la librairie "Fd". Cet élément logiciel peut se connecter à différents types de sources ou de destinations mais, contrairement au "main frame builder", il ne peut recevoir de frames de plusieurs sources à la fois. Figure de droite : gestion de la mémoire partagée du "main frame builder".

Comme indiqué sur la figure 4.2, les frames écrits en mémoire partagée peuvent être lus par un ou plusieurs diffuseurs de frames (ou "frames providers"). Ces diffuseurs peuvent ensuite envoyer sur le réseau Ethernet ou écrire sur disque le frame qu'ils ont lu. Plusieurs diffuseurs peuvent lire en même temps la mémoire partagée. Cela permet d'envoyer en parallèle différents frames vers différentes destinations.

4.5 Les utilitaires du DAQ

Pour tester le "main frame builder", pour compléter ses fonctionnalités ou, plus généralement, pour surveiller ponctuellement l'acquisition de données, des utilitaires s'avèrent utiles voire nécessaires. Au cours du développement de la librairie "Fd", j'ai écrit un ensemble de programmes permettant de simuler des sources de frames, de contrôler les données dans la chaîne d'acquisition, de les envoyer sur le réseau Ethernet ou de les écrire sur disque.

- **Réception/Diffusion de données (FdIOServer)** : Ce code de 140 lignes est la "particule élémentaire" du DAQ décrite au paragraphe 4.3. Le plus souvent, il est utilisé soit pour envoyer sur le réseau Ethernet des frames lus dans une mémoire partagée, soit pour distribuer des frames reçus d'une source Ethernet en les écrivant dans une mémoire partagée.
- **Ecriture des données (FdWrite)** : Ce programme permet de se connecter à une source de frames au sein de la chaîne d'acquisition de données, de recevoir ensuite des frames ne

contenant que les signaux souhaités et de les écrire sur disque après éventuelle compression des données. Il gère le nombre de frames par fichier et le nombre maximum de fichiers gardés sur disque.

- **Contrôle des données par le réseau Ethernet (FdStat) :** Ce programme permet de se connecter à une source de frames au sein de la chaîne d'acquisition de données, de recevoir ensuite des frames ne contenant que les signaux souhaités et de montrer périodiquement des valeurs statistiques (moyenne, rms, max, min...) calculées sur ces données ou le contenu complet des frames reçus.
- **Contrôle des données en mémoire partagée (FdShmSpy) :** Ce programme se connecte à une mémoire partagée et montre des informations sur son état, son contenu en frames ainsi que la zone où le "producer" de la mémoire partagée est en train d'écrire.
- **Contrôle des serveurs du DAQ (FdStatus) :** Cet utilitaire est l'ancêtre de l'interface graphique décrite au paragraphe 4.8. A travers le réseau Ethernet, il se connecte à un serveur du DAQ et lui demande de fournir son état ainsi que des informations sur le dernier frames de données qu'il a vu passer.
- **Simulateur de source de frames (FdSim) :** Ce programme construit des frames et les envoie sur le réseau Ethernet, en mémoire partagée ou sur disque, simulant ainsi un des "constructeurs de frames" ou un des "collecteurs de frames" de la chaîne d'acquisition. Il peut générer différents types de données, simuler des frames contenant des données corrompues ou des frames contenant des signaux absents par intermittence. Il peut aussi simuler des frames manquant dans le flux de données. Il s'est révélé utile pour tester la chaîne d'acquisition de données, notamment le "main frame builder", ou pour tester le programme "dataDisplay" en ligne décrit au paragraphe 5.1.

4.6 Schéma général de l'acquisition de données de Virgo

Le système d'acquisition de données de Virgo est réparti en trois niveaux : le "front-end", les "constructeurs de frames" et les "collecteurs de frames". La figure 4.3 montre ces trois niveaux et l'architecture générale de l'acquisition de données.

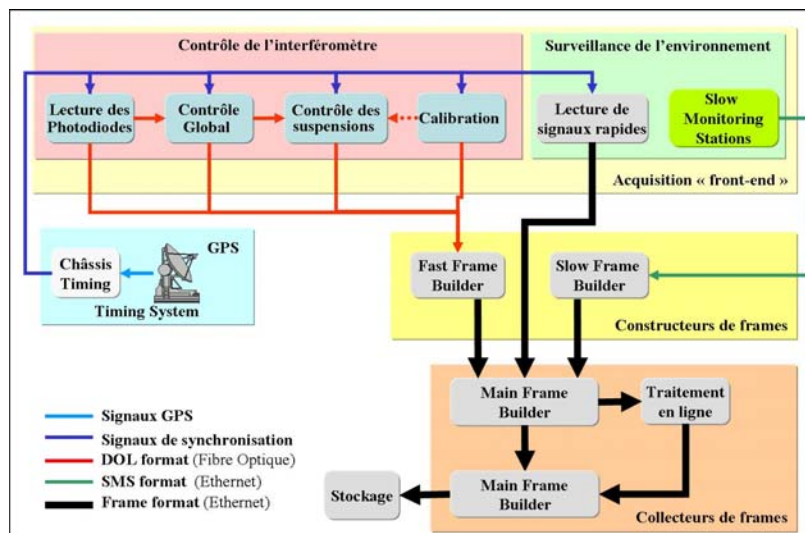


FIG. 4.3 – Architecture générale de l'acquisition de données, avec ses trois niveaux "front-end", "constructeurs de frames" et "collecteurs de frames". Sont également représentés le système de synchronisation GPS et les différents formats de données utilisés au niveau "front-end".

Premier niveau : les lectures "front-end" :

Les lectures "front-end" fournissent toutes les données brutes de Virgo et sont cadencées par les signaux provenant d'un système centralisé synchronisé sur le temps GPS. La plupart fonctionne sur des processeurs RIO, dans des châssis VME. Soit elles ne sont pas impliquées dans les boucles de contrôle de l'interféromètre et envoient alors par le réseau Ethernet leurs données parfois déjà formatées en frames, soit elles envoient leurs données par fibres optiques vers des constructeurs de frames.

- Les "Slow Monitoring Station" (SMS) envoient des données de surveillance lente (au maximum une fois par seconde) comme les températures auprès des suspensions ou la pression dans les enceintes à vide.
- Les lectures rapides pour la surveillance de l'environnement envoient des signaux de microphone, de sismomètres, d'accéléromètres, de magnétomètres, etc... pris en différents points de l'interféromètre.
- Les lectures des caméras CCD envoient les profils des faisceaux ou des données concernant l'alignement des miroirs.
- Les lectures pour le banc de détection (Pi et Mc) envoient des données concernant le Mode-Cleaner de sortie et l'alignement du banc de détection.
- Les lectures des photodiodes de détection envoient essentiellement les données utilisées dans les boucles de contrôle de l'interféromètre (dont le signal de frange noire).

- Les lectures des photodiodes quadrants envoient les données utilisés pour contrôler l’alignement des cavités et des éléments de l’interféromètre.
- Les lectures des signaux de suspensions envoient les données concernant le contrôle des suspensions aux trois niveaux décrits sur la figure 3.4.

Deuxième niveau : les constructeurs de frames

Les constructeurs de frames sont une étape clé de la chaîne d’acquisition. Ils rassemblent, sous format frame, des données provenant de différentes sources du premier niveau mais identiquement formatées. Deux types de constructeurs ont été développés.

- Les ”fast frame builders” collectent les données envoyées par fibre optique depuis les lectures ”front-end” impliquées dans les boucles de contrôle (lecture de photodiodes et de photodiodes quadrants, lecture des signaux de suspensions). Ils fonctionnent sur des processeurs RIO sous LynxOS, dans des chassis VME.
- Les ”slow frame builders” collectent les données envoyées par Ethernet depuis les SMS. Ils fonctionnent sur des stations de travail Linux et sont cadencés à travers Ethernet par le programme de gestion du système de synchronisation de Virgo.

Troisième niveau : les collecteurs de frames

Aussi appelés ”main frame builders”, ces programmes rassemblent les frames envoyés par Ethernet depuis les différents constructeurs de frames et rendent le frame résultant disponible dans une mémoire partagée (voir paragraphe 4.4). Les collecteurs de frames sont également utilisés plus en aval dans la chaîne d’acquisition pour collecter les résultat de traitement en ligne des données. J’ai construit ces programmes et assuré leur maintenance jusqu’à aujourd’hui.

Dans la configuration mise en place à la fin de l’année 2001 (figure 4.4), pour rendre plus souple l’accès en ligne aux données et pour pouvoir distribuer des traitements en ligne consommant beaucoup de CPU, nous avons choisi de paralléliser la collection de données sur trois ”main frame builders”, FbmMoni, FbmSusp et FbmDet, chacun rassemblant les données d’un même type de source : ”FbmSusp” pour les données provenant des suspensions, ”FbmDet” pour les données du système de détection et du contrôle global, ”FbmMoni” pour les données issues de la surveillance de l’environnement. Un collecteur central (FbmMain) rassemblait l’ensemble des données envoyées par les trois collecteurs précédents. Cette configuration a été décrite dans une note Virgo [55] et présentée en conférence [56]. Elle a constitué une première étape validant les choix qui avaient été faits avant la construction du détecteur et permettant une acquisition des données stable durant le commissioning du CITF.

A partir de l’année 2003, le commissioning de Virgo a nécessité un nombre croissant de signaux à enregistrer, des traitements en ligne plus nombreux et une latence minimale entre le contrôle de l’interféromètre et sa surveillance en ligne. La modularité de l’acquisition de données, fournie notamment par la librairie ”Fd”, a permis d’une part de soutenir le flux croissant de données et d’autre part de faire évoluer la configuration du DAQ pour diminuer la latence jusqu’au niveau requis pour automatiser la procédure de verrouillage de l’interféromètre et mettre en place les traitement en ligne réclamés par le commissioning. Les figures 4.5 et 4.6 montrent la configuration en place à la fin de l’année 2006. Cette configuration est plus complexe mais possède les mêmes outils logiciels que celle de 2001.

J’ai participé à la conception et à la mise en place de l’acquisition de données en 2001

puis aux améliorations apportées de 2003 à aujourd'hui. La description complète du système d'acquisition de données fait l'objet d'une note Virgo en cours d'écriture. Une description plus synthétique du DAQ et de la surveillance en ligne du détecteur fait l'objet d'un article à paraître dans Nuclear Instruments and Methods. Je vais d'autre part présenter l'acquisition de données et ses liens avec les contrôles de l'interféromètre à la conférence IEEE-NPSS RT2007, qui se déroule à Fermilab du 28 avril au 5 mai 2007.

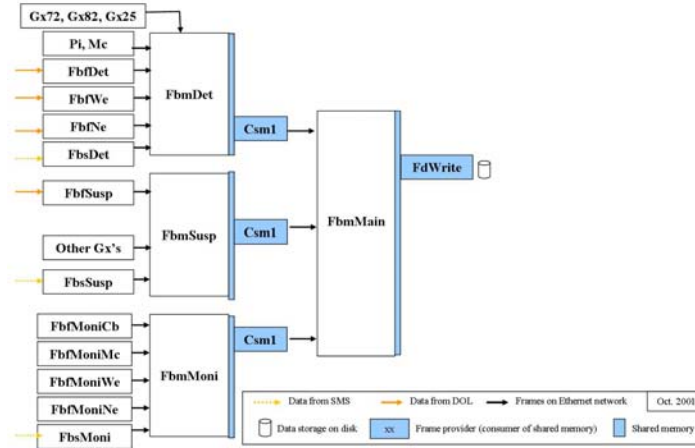


FIG. 4.4 – Configuration du système d'acquisition de données en novembre 2001. Les "Gx..." sont les serveurs qui collectent les images des caméras CCD qui surveillent les faisceaux dans l'interféromètre. "Pi" et "Mc" envoient des données déjà au format frame. Ces données concernent le Mode-Cleaner de sortie et l'alignement du système de détection. Les "Fbs..." sont les "Slow Frame Builders" qui reçoivent les données des SMS (Slow Monitoring Stations) et les propagent sous format frame. Les "Fbf..." sont les "Fast Frame Builders" qui, pour la plupart d'entre eux, reçoivent les données par DOL (Digital Optical Link). Les "Csm1" sont les diffuseurs de frames qui propagent les données vers le collecteur central "FbmMain".

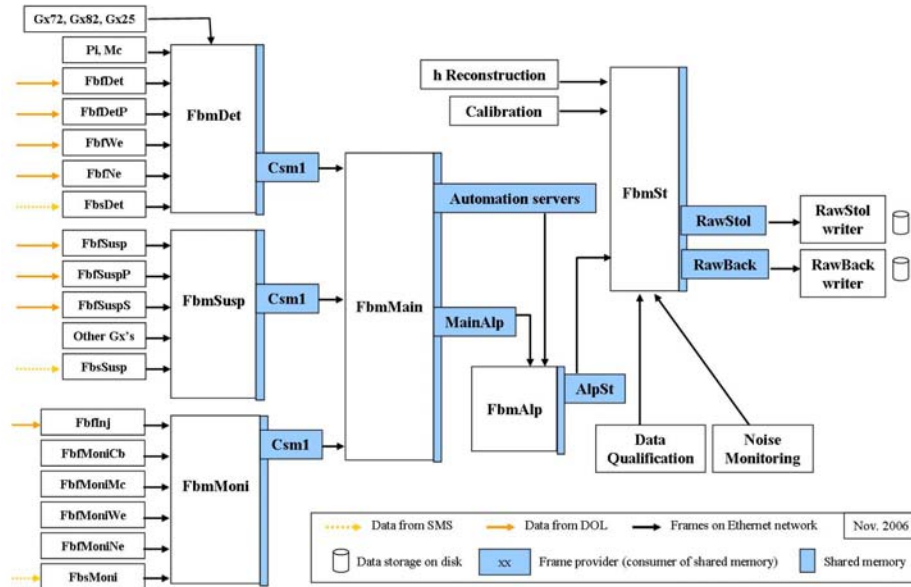


FIG. 4.5 – Configuration du système d'acquisition de données en novembre 2006. Plusieurs changements ont eu lieu par rapport à la configuration de 2001. Tout d'abord, l'augmentation du flux de données a nécessité l'ajout de nouveaux "fast frame builders". Ensuite, les serveurs dédiés à l'automatisation du verrouillage de l'interféromètre ont réclamé l'ajout d'un étage de collection supplémentaire (FbmAlp). Puis, les nouveaux traitements en ligne (Detector Monitoring, Noise Monitoring, h Reconstruction) ont demandé un autre étage de collection (FbmSt). Enfin, le stockage des données sur 120 TB de disque se fait par l'écriture dans un buffer intermédiaire (RawStol) et est sécurisé par une écriture en parallèle sur un buffer temporaire (RawBack).

4.7 Accès aux données et traitements en ligne

Une fois mise en place la chaîne d'acquisition de données, le commissioning du détecteur nécessite une surveillance et une analyse rapide des signaux de l'interféromètre. Nous avons alors développé des outils permettant l'accès aux données (en ligne ou en différé) et des traitements en ligne requis par l'analyse de données ou le commissioning du détecteur. Grâce à la flexibilité de l'acquisition de données, il a été possible de mettre en place facilement des points d'accès aux données dans la chaîne d'acquisition et de connecter les différents traitements en ligne. Ils sont présentés dans les paragraphes suivants et la figure 4.6 montre leur insertion dans l'architecture de l'acquisition de données.

4.7.1 Accès différé aux données

A la sortie de la collection de données, le flux de données brutes est composé d'environ 2340 canaux (1370 canaux rapides et 970 canaux de "slow monitoring") pour un total supérieur à 20 MB/s. Un algorithme de compression des données, utilisé dans les "constructeurs de frames", permet de réduire cette quantité à environ 8 MBytes par seconde (soit un peu plus de 680 GBytes par jour enregistrés sur disque). Cette grande quantité de données est tout d'abord stockée sur un buffer circulaire de 4 TBytes (environ une semaine de données). Les données sont ensuite

copiées sur le stockage différé constitué de 70 disques de 1.7 TB chacun (120 TB en tout, soit environ six mois de données).

L'accès aux données se fait par des fichiers ASCII mis à jour toutes les 4 minutes : les ffl (frame files list), qui contiennent les informations de base sur les fichiers de données écrits sur disque (localisation, temps GPS du premier frame, nombre de frames contenus). N'importe quel dataDisplay ou programme d'analyse peut ainsi accéder facilement et rapidement à un fichier de données. Puis, grâce à la TOC (Table Of Contents) du fichier de données, il peut accéder rapidement à n'importe quel vecteur de données dans le fichier. Le ffl et la TOC fournissent ainsi un accès aléatoire et rapide aux vecteurs de données.

4.7.2 Accès en ligne aux données

Les points d'accès en ligne sont des programmes que j'ai réalisés (les FdIOServer décrits au paragraphe 4.5). Ils permettent, via Ethernet, de connecter des outils de contrôle statistique (FdStat), d'écriture sur disque (FdWrite) ou de visualisation en ligne (dataDisplay) des données. Ces points d'accès (par exemple "MainUsers" ou "DetShift" sur la figure 4.6) sont des processus séparés qui perturbent peu le reste du système d'acquisition car ils utilisent une mémoire partagée en parallèle avec les autres diffuseurs de frames du DAQ et ne consomment en moyenne que quelques pourcents du CPU.

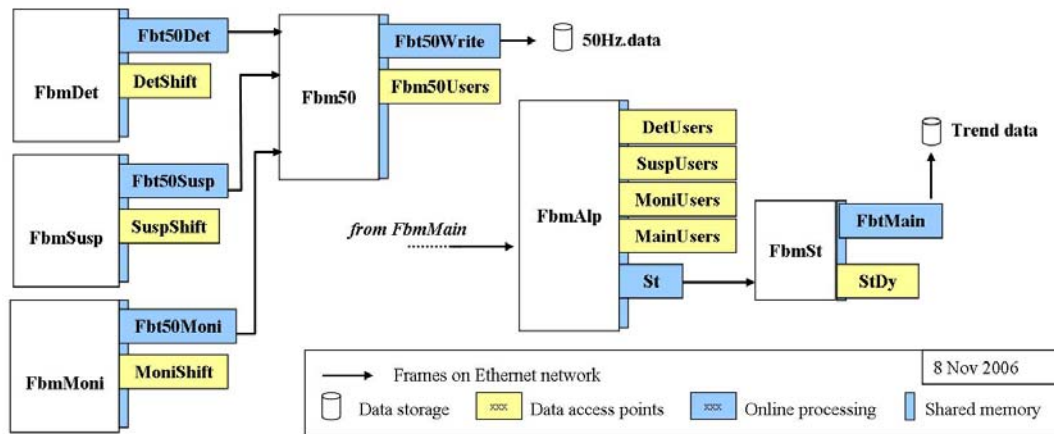


FIG. 4.6 – Les traitements en ligne (couleur bleue) et les points d'accès en ligne aux données (couleur jaune) au sein de l'architecture du DAQ, en novembre 2006.

4.7.3 Traitements en ligne enrichissant le flux de données brutes

Un certain nombre de traitements en ligne, présentés ci-dessous, ont été mis en place ces dernières années afin d'enrichir le flux principal de données en informations utiles pour l'analyse ou la surveillance du détecteur ("flags" de qualité, rms calculés dans une bande de fréquence, signaux transitoires détectés, etc...).

- **Calcul de RMS dans une bande de fréquence :** Connecté sur une mémoire partagée, le serveur BRMSMoni calcule pour un ensemble de signaux des RMS intégrés sur des

bandes de fréquence données. Ces valeurs sont utilisées par la suite pour suivre l'évolution d'un bruit de contrôle dans l'interféromètre ou pour surveiller par exemple le bruit sismique environnant dans différentes bandes de fréquence. J'assure actuellement la maintenance de ce serveur.

- **Qualification des données :** Connectés sur la mémoire partagée d'un "FdIOServer" dédié (FbmDM), plusieurs algorithmes surveillent les différentes parties de l'interféromètre et créent des "flags" de qualité résumant l'état de l'interféromètre. Ces "flags" sont visualisés en salle de contrôle à travers le web, mais aussi insérés dans le flux de données de l'acquisition grâce à un autre collecteur de frames (FbmQc). J'ai réalisé l'ensemble des outils logiciels qui assurent cette surveillance en ligne et cette qualification des données (voir paragraphe 5.2).
- **Surveillance en ligne du bruit du détecteur :** Le signal de frange noire en sortie de l'interféromètre est analysé en ligne par un ensemble d'algorithmes qui tentent d'y détecter des signaux transitoires (glitches) ou des non-stationnarités présentes sur de plus grandes échelles de temps. Ces algorithmes, créés et testés par les membres de l'expérience Virgo, sont connectés sur la mémoire partagée d'un collecteur de frames dédié (FbmNoise). Leurs résultats sont collectés par un autre "main frame builder" (FbmStNoise) et vont ensuite rejoindre le flux de données brutes de l'acquisition. J'ai mis en place et j'assure le suivi de deux algorithmes et de l'ensemble de cette architecture logicielle (voir chapitre 6.3).

4.7.4 Traitements en ligne créant de nouveaux flux de données

L'analyse de données ou certaines tâches de commissioning avaient besoin de nouveaux signaux ou d'un accès simple et rapide à de longues périodes de données. Nous avons pour cela créé de nouveaux flux de données, générés par des traitements en ligne spécifiques. Excepté pour le traitement en ligne générant des "densités spectrales", ma contribution dans ce domaine se limite aux échanges de frames assurés par la librairie "Fd".

- **Les données 50 Hz :** Les données rééchantillonnées à 50 Hz permettent une analyse plus rapide de la partie basse fréquence des signaux impliqués dans le contrôle de l'interféromètre et de signaux environnementaux comme le bruit sismique. Comme le montre la figure 4.6, le rééchantillonnage à 50 Hz est assuré par un ensemble de trois diffuseurs branchés sur des mémoires partagées. Ils fournissent des signaux rééchantillonnés à 50 Hz après passage par un filtre anti-repliement du 7ème ordre (fréquence de coupure à 20 Hz). Ces données rééchantillonnées représentent un flux de 0.1 MByte/s, soit 9 GBytes par jour.
- **Les "trend data" :** Les trend data permettent de visualiser, sur des périodes de plusieurs jours, l'évolution du détecteur et de son environnement ou l'évolution de certains paramètres du système d'acquisition lui-même (latences, flux, nombre de canaux...). Connecté à la mémoire partagée du collecteur final de l'acquisition de données (FbmSt), le "Trend Frame Builder" est un programme qui, pour chaque signal de données brutes, génère un résumé statistique sous forme de 4 valeurs (moyenne, rms, minimum et maximum) calculées sur la durée d'un frame. Les données de "slow monitoring" et les statistiques créées par le "Trend Frame Builder" sont rangées dans des "trend frames" de 1800 secondes écrites sur disque à raison de 0.0045 MByte/s soit environ 0.4 GByte par jour.

- **Les données reconstruites** : Les informations issues de la calibration permettent de reconstruire les variations relatives de longueur des bras de l'interferomètre, donc la quantité h représentant l'amplitude de l'onde gravitationnelle équivalente. La reconstruction de h est réalisée en ligne par un programme (HRec) connecté à la mémoire partagée d'un "FdIOServer" dédié (OPIn). Ces données enrichissent le flux principal de données mais sont écrites aussi sur disque en parallèle. Elles représentent un flux d'environ 0.2 MB/s, soit 17 GBytes par jour.
- **Recherche en ligne de signaux d'ondes gravitationnelles** : Les données "h" reconstruites en ligne sont aussi envoyées vers un ensemble d'algorithmes de recherche en ligne de signaux de coalescences binaires. La plupart des éléments mis en place pour cela sont basés sur les outils du DAQ [64]. Les résultats de ces algorithmes sont écrits sur disque pendant chaque prise de données. A terme, ils devraient venir aussi enrichir le flux de données principal.
- **Les densités spectrales** : Ces données sont écrites sur disque par SpectroMoni, un programme qui calcule une densité spectrale moyenne pour différents signaux de contrôle de l'interféromètre (signal de frange noire, puissance dans les cavités Fabry-Perot, signal de correction de la fréquence du laser, etc...). J'ai écrit le code de SpectroMoni et assuré sa mise en ligne. J'assure également la gestion des fichiers écrits pour ce flux de données et la maintenance des spectrogrammes construits à partir de ces données et visibles sur le web (<http://wwwcascina.virgo.infn.it/MonitoringWeb/Spectro>). Les frames correspondants représentent un flux d'environ 360 MBytes par jour.

Chacun de ces nouveaux flux de données est enregistré sur disque au format "frame". Comme pour les données brutes, ces données sont ensuite accessibles de façon rapide et aléatoire grâce à des fichiers ffl (frames files list) qui contiennent la liste des fichiers écrits sur disque et jouent le rôle de base de données élémentaire.

4.8 Surveillance du système d'acquisition de données

Une fois mise en place l'acquisition de données, l'accès aux données et les traitements en ligne, comment garantir que toutes les données arrivent jusqu'au stockage et en bon état ? A chaque niveau de l'acquisition de données ("front-end", "constructeurs de frames", "collecteurs de frames", "écriture sur disque"), une défaillance peut entraîner l'absence de données ou la présence de données corrompues. Pour surveiller le bon fonctionnement de l'ensemble du système d'acquisition et de stockage des données, plusieurs outils, décrits ci-dessous, ont été mis en place. Les deux premiers permettent une surveillance à long terme permettant par exemple d'estimer les performances de l'acquisition. Le troisième permet, avec une latence de quelques secondes maximum, de surveiller l'état des serveurs de l'acquisition de données.

4.8.1 Surveillance du stockage des données

Un programme dédié à la vérification des fichiers et de leur contenu (Fm) analyse chaque fichier de données dès sa fermeture : Il vérifie tout d'abord l'état du fichier grâce à un "checksum" réalisé sur les octets constituant le fichier, puis entreprend de vérifier la présence de certains

canaux dans tous les frames du fichier afin d'estimer les pertes de données qui se seraient produites dans la chaîne d'acquisition, avant l'écriture sur disque.

4.8.2 Surveillance de la propagation des données

Par ailleurs, certains canaux de "Slow Monitoring" sont fabriqués spécifiquement pour la surveillance du DAQ. Ceci permet, par exemple, un suivi de la taille des frames, des latences introduites dans la chaîne d'acquisition ou du nombre total de canaux enregistrés. Ces informations sont importantes car toute forte variation de ces quantités correspond à un risque de perte de données dans la chaîne d'acquisition. Aussi, afin de suivre en ligne l'évolution du DAQ, certaines de ces informations sont visibles sous forme graphique sur une page web (<http://www-cascina.virgo.infn.it/MonitoringWeb/DAQ>). J'assure la maintenance de cette page web et j'ai mis en place la génération de ces données de surveillance du DAQ au sein des collecteurs de frames.

Collect		active	GP5 847041091 - Nov 08, 2006 (312) 18:11:18
TiServer		Golden	fr:20187 nn04635 GP5:847041092-156700 - Qc 0x0010c022
Detection DAQ line			
FbDet		Golden	fr:20186 (1.23e+03 KB) [0/4]
FbDetOp		Golden	fr:20186 (1.22e+03 KB) [0/4]
FbHe		Golden	fr:20186 (879 KB) [0/4]
FbWe		Golden	fr:20186 (1.11e+03 KB) [0/4]
FbsDet		Golden	fr:20187 (21.454 KB) Latency: 0.229
FbmDet		golden	fr:20185 (4.49 MB) latency:1.71 adc:545 sms:28
Monitoring & Injection DAQ line			
FbMoniCb		Golden	fr:20186 (820 KB) [0/4]
FbMoniMc		Golden	fr:20186 (80.2 KB) [0/4]
FbMoniHe		Golden	fr:20186 (200 KB) [0/4]
FbMoniWe		Golden	fr:20186 (204 KB) [0/4]
FbInj		Golden	fr:20186 (1.32e+03 KB) [0/4]
FbsMoni		Active	fr:20187 (13.142 KB) Latency: 0.0249 - lost VbCa
FbmMoni		golden	fr:20186 (3.14 MB) latency:1.65 adc:339 sms:20

FIG. 4.7 – Un exemple de ce que montre l'interface graphique de pilotage du DAQ. Chaque ligne correspond à un serveur de l'acquisition. Pour chacune d'elles, le bouton de gauche change de couleur si le serveur s'arrête ou ne fonctionne plus de manière optimale (sources de données absentes, latence trop importante, problème de connexion avec l'interface graphique...).

4.8.3 Surveillance des serveurs du DAQ

Enfin, la surveillance en ligne du DAQ est essentiellement assurée par une interface graphique qui permet de surveiller, démarrer ou arrêter chaque serveur de l'acquisition de données. Cette interface, basée sur la librairie Xforms, a été développée au LAPP. La figure 4.7 montre un exemple de ce que visualise cette interface graphique. Chaque ligne montre l'état d'un serveur et le bouton de gauche sur chaque ligne permet de gérer le démarrage ou l'arrêt du serveur, de changer sa configuration ou d'accéder à des informations complémentaires. Cet outil a permis de gérer plus rapidement et plus efficacement les arrêts et redémarrage des serveurs et de fournir

en salle de contrôle une visualisation immédiate de l'état des serveurs de toute l'acquisition de données. Ces mêmes informations sont consultables à distance à travers le web ¹.

4.9 Performances du système d'acquisition de données

La surveillance de la propagation des données dans la chaîne d'acquisition a permis d'estimer les performances du DAQ en termes de stabilité, de pertes de données, de latence ou de soutien du flux de données.

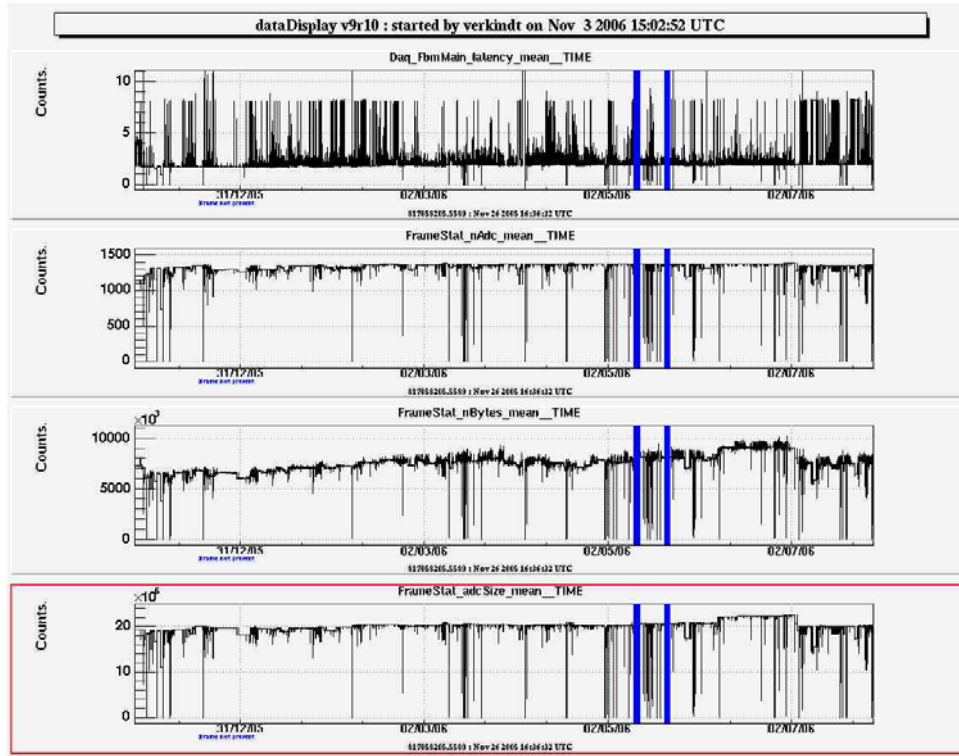


FIG. 4.8 – De haut en bas, latence (en secondes), nombre total de canaux, flux de données et flux de données compressées (en bytes) vus par l'acquisition de données, du 26 novembre 2005 au 31 juillet 2006).

¹<http://wwwcascina.virgo.infn.it/sDoc/runStatus/CIDaqCollect.html>

Sur ces différents points, les résultats sont les suivants :

- La latence moyenne du DAQ (hors traitement en ligne) est inférieure à 2 secondes, c'est à dire suffisamment réduite pour permettre l'automatisation des procédures de contrôle de l'interféromètre.
- Le flux de données soutenu par le DAQ est très variable car, d'une part, le nombre de canaux dépend de la période de commissioning et, d'autre part, l'efficacité de la compression des données dépend de l'état du détecteur. En moyenne, ce flux est supérieur à 20 MBytes/s (8 MBytes/s de données compressées). Ce qui représente 4 fois le flux de données envisagé lors des choix qui ont été faits pour le DAQ en 1997 et qui se sont révélés robustes face à cette "inflation".
- Le nombre de canaux rapides (fréquence d'échantillonnage supérieure à 1 Hz) enregistrés est en moyenne de 1360 (dont plus de 1000 sont dédiés à la surveillance de l'environnement ou des boucles de contrôle de l'interféromètre).
- Le pourcentage de perte de données est difficile à estimer pour l'ensemble des canaux car le nombre de canaux enregistrés par l'acquisition varie selon les besoins du commissioning. Il a cependant été estimé pour le signal de frange noire et se révèle inférieur à 0.1% sur la plupart des runs de commissioning et inférieur à 0.3% sur l'ensemble des années 2004 à 2006. Cette estimation intègre toutes les périodes de maintenance du détecteur, les périodes avec des problèmes de disques ou des pannes de réseau, les mises à jour de machines ou d'Operating System, les arrêts du DAQ pour des changements de configuration ou des changements de versions de bibliothèques.

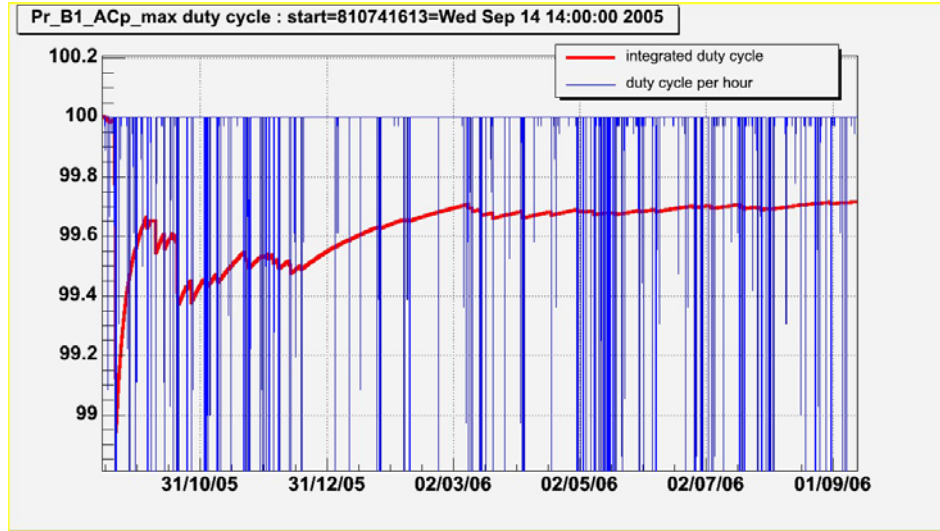


FIG. 4.9 – Pourcentage de données du signal de frange noire non perdues, par tranche d'une heure et intégré, entre le 26 novembre 2005 et le 31 juillet 2006),

Pour compléter ces informations, la figure 4.8 montre sur l'année 2006 l'évolution de la latence, du nombre de canaux rapides et du flux de données dans l'acquisition. La figure 4.9 montre sur cette même année le cycle utile du DAQ.

Le tableau 4.1 montre l'évolution du DAQ depuis juillet 2002 (fin du commissioning du CITF). On peut constater, entre 2002 et 2006, une augmentation du nombre de processus, une augmentation du nombre de canaux et du flux de données tandis que la latence se réduit à 2 secondes et que la perte de données se réduit à 0.3% environ. Le tableau 4.2 fournit des détails sur les pertes de données en montrant le cycle utile de l'acquisition de données entre janvier 2004 et septembre 2006 et durant chaque prise de données de commissioning.

Date	Jul2002	Jul2003	Feb2004	Dec2004	Aug2005	Nov2006
Run (duration)	E4 (72h)	C0 (28h)	C2 (72h)	C5 (120h)	C6 (336h)	WSR5 (72h)
Canaux rapides	690	790	1180	1340	1330	1385
Canaux de trend data	3260	4000	5670	7880	7450	9473
Flux de données comp. (MB/s)	4.2	4.7	5.8	6.7	6.3	7.9
Serveurs "front-end"	24+24	—	31+45	31+78	29+65	30+72
Constructeurs de frames	22	—	30	30	31	34
Collecteurs de frames	4	4	5	7	8	11
Capacité de stockage (TB)	2	6	32	70	120	120
Latence totale (s)	8	8	7	6	4	22.7
Latence en ligne (s)	8	8	6	5	3	1.9
Pourcentage de données perdues	—	—	—	0.18%	0.24%	0.023%
"Streams" de données	2	3	4	6	6	6

TAB. 4.1 – Evolution de quelques paramètres du DAQ sur les 4 dernières années. La latence totale est mesurée entre l'instant de lecture des ADC et l'instant où les données sont écrites sur disque (en 2006, cette latence incluait 20 secondes supplémentaires nécessaire à la qualité de la reconstruction de h). La latence en ligne est mesurée entre la lecture des ADC et le principal collecteur de frames (FbmMain) à partir duquel les données sont disponibles pour les processus d'automatisation. Le pourcentage de données perdues correspond au pourcentage de temps où le signal de frange noire n'est pas enregistré.

Au vu de ces performances, l'acquisition de données de Virgo, dont j'ai été l'un des maîtres d'oeuvre, a rempli son contrat depuis plusieurs années, que ce soit en terme de flux de données soutenu, de latence ou de perte minimale de données. Les outils logiciels que j'ai développés sont toujours utilisés. Ils ont apporté une grande flexibilité qui a permis, par exemple, de connecter facilement au DAQ les traitements en ligne ou les outils de surveillance en ligne du détecteur.

Flux de données	Date	Start GPS	durée (s)	Cycle utile	Frames manquants
Trend data	Jan2004-Jan2005	757585800	31400000	96.509%	609
Trend data	Jan2005-Jan2006	788572813	31400000	97.180%	492
Trend data	Sep2005-Sep2006	810741613	31400000	97.770%	389
Données brutes	Jan2004-Jan2005	757585800	31400000	99.997%	754
Données brutes	Jan2005-Jan2006	788572813	31400000	99.775%	68325
Données brutes	Sep2005-Sep2006	810741613	31400000	99.716%	86854
Données brutes	C3 (23 Apr 2004)	766771515	436000	100.000%	0
Données brutes	C4 (24 Jun 2004)	772120975	436000	100.000%	0
Données brutes	C5 (02 Dec 2004)	786031360	436000	99.828%	753
Données brutes	C6 (28 Jul 2005)	806602213	1296000	99.760%	1101
Données brutes	C7 (14 Sep 2005)	810741613	403200	99.987%	53
Données brutes	WSR1 (08 Sep 2006)	841784413	201600	100.000%	1
Données brutes	WSR2 (23 Sep 2006)	843001214	201600	99.987%	27
Données brutes	WSR5 (10 Nov 2006)	847231214	201600	99.977%	46
Données brutes	WSR6 (01 Dec 2006)	849045614	201600	99.995%	11
Données brutes	WSR7 (12 Jan 2007)	852678014	201600	99.940%	123
Données brutes	WSR8 (9 Feb 2007)	855093614	201600	99.976%	48

TAB. 4.2 – Estimation du cycle utile du DAQ entre janvier 2004 et septembre 2006 pour les "trend data" et les "données brutes" (signal de frange noire uniquement). Sont aussi montrés les cycles utiles du DAQ pendant chaque prise de données de commissioning depuis janvier 2004. Cette estimation intègre toutes les périodes de maintenance du détecteur, les problèmes de disques, les pannes de réseau, les mises à jour de machines ou d'Operating System, les arrêts du DAQ pour des changements de configuration ou de version de librairie.

4.10 L'évolution future du DAQ

Depuis l'été 2001, l'acquisition de données de Virgo a fonctionné quasiment en continu et a été régulièrement améliorée sans pour autant que soit changés l'architecture principale, la philosophie générale, les librairies logicielles ou les standards qui avaient été choisis (VME, Ethernet, fibres optiques, LynxOS, Linux, mémoire partagée...). Les logiciels du DAQ développés sur la base de ces choix ont été régulièrement améliorés et montrent désormais une très bonne fiabilité.

Malgré quelques problèmes NFS, quelques défaillances de CPU ou de "switchs" Gigabits, et quelques bugs dans la librairie Cm ou dans les librairies et serveurs développés, l'acquisition de

données a rempli sa mission sur plusieurs années, que ce soit en terme de pertes minimales de données, de réduction de la latence ou de gestion du flux de données.

Cependant, quelques modifications seront sans doute nécessaires à moyen terme. En effet, des développements sont actuellement en cours pour améliorer le détecteur Virgo dans les deux années à venir, avec notamment des asservissements plus rapides et moins bruyants. Dans cette perspective, certaines parties du DAQ utilisées pour les contrôles de l'interferomètre doivent être redéfinies. Par exemple, de nouvelles cartes VME sont à l'étude pour le système de timing et pour la propagation des signaux par fibres optiques (DOL) [?]. Cette nouvelle partie "front-end" de l'acquisition offrira plus de possibilités et sera plus rapide, doublant au moins le flux de données collectées. Dans le même temps, à part quelques modification mineures sur la librairie "Fd" ou sur les collecteurs de frames (par exemple l'utilisation du temps GPS dans l'assemblage des frames), aucun nouveau développement n'est prévu pour la collection de données ou le traitement en ligne. Moyennant l'utilisation de machines plus puissantes ou plus nombreuses, ils devraient s'adapter à ce nouveau flux et à d'éventuelles demandes supplémentaires de calculs. Ceci grâce à la flexibilité des outils logiciels développés et grâce aux choix qui ont été faits (réseau Ethernet, PC Linux, mémoire partagée, librairie "Fd").

Chapitre 5

La surveillance en ligne de Virgo

Virgo doit être opérationnel 24h sur 24h tout en étant très exposé aux bruits instrumentaux ou environnementaux du fait de sa grande sensibilité. Cette contrainte demande une grande sélectivité de l'analyse de données et une acquisition de données très fiable. Mais elle demande aussi une surveillance permanente du fonctionnement de l'interféromètre, d'abord pour fournir en salle de contrôle une information mise à jour rapidement, ensuite pour aider à la sélection des segments de données prioritaires pour l'analyse.

Cette surveillance en ligne du détecteur est assurée de deux façons. D'une part, Virgo dispose d'un ensemble de capteurs environnementaux et de capteurs liés aux suspensions des miroirs. D'autre part, Virgo a développé depuis plusieurs années des outils logiciels pour la visualisation et pour la qualification des données. La plupart de ces outils sont issus de mon travail. Ils utilisent souvent les bibliothèques logicielles créées pour le DAQ et bénéficient donc de leur fiabilité. Je présente ici deux outils importants que j'ai développés pour la surveillance du détecteur et l'analyse des données. A ces deux outils s'ajoute une surveillance web de plus grande latence (supérieure à la minute) mise en place par le LAPP et à laquelle j'ai contribué.

5.1 Le dataDisplay

Un premier besoin essentiel du commissioning du CITF et de Virgo a été de pouvoir surveiller en ligne depuis la salle de contrôle un grand nombre de signaux fournis par l'interféromètre. Ceci avec une latence minimale afin de visualiser rapidement les conséquences d'une action sur l'interféromètre. J'ai alors commencé à développer un logiciel, le "dataDisplay", qui permet de visualiser facilement et quasiment en temps réel les signaux issus de l'acquisition de données. Le dataDisplay a été développé spécifiquement pour l'expérience VIRGO. Il permet, au travers d'une interface graphique relativement simple, de manipuler et de visualiser les différents types de données au format frame enregistrées par l'expérience.

Au cours des années, le dataDisplay s'est enrichi de fonctionnalités nouvelles et de différents types de graphiques. Il a d'abord été capable de lire les signaux fournis par l'acquisition de données et de créer puis éditer différents types de graphiques pour la surveillance en ligne du détecteur (données en fonction du temps, spectres en fréquence, distributions 1D et 2D, images du faisceau laser en différents points de l'interféromètre). Puis, se sont ajoutés des graphiques utiles pour l'analyse des signaux (fonction de transfert, fonction de cohérence, spectrogrammes,

etc...) et des facilités de traitement des signaux et d'édition des graphiques. Par exemple, plusieurs graphiques peuvent être superposés, y compris lorsqu'ils concernent des signaux acquis à des temps différents. Il est également possible de faire des opérations sur les signaux, de faire des opérations sur les plots (offset, multiplication par une constante, zooms multiples, filtrages, intégrales, etc...) ou d'écouter les données en ligne voire de les sauvegarder dans un fichier au format "wave pcm". Le dataDisplay s'est aussi doté récemment d'une fonction de "trigger" qui lui permet de ne mettre à jour les graphiques que sur des segments de données respectant certaines conditions (par exemple la valeur d'un signal supérieure à un certain seuil, un "flag" de qualité non nul ou le résultat d'un algorithme de recherche de glitch supérieur à un certain seuil).

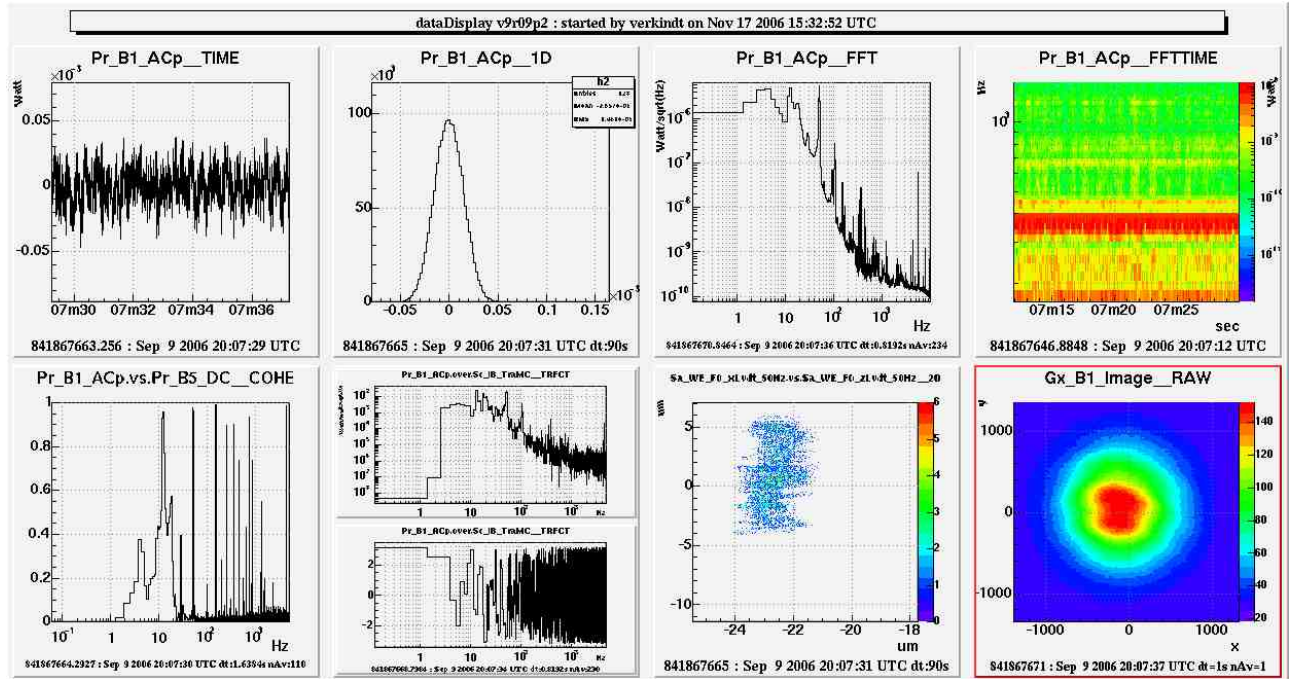


FIG. 5.1 – Exemples de graphiques créés par le dataDisplay à partir des données reçues du système d'acquisition. Sur la première ligne sont visibles le signal de frange noire en sortie de l'interféromètre en fonction du temps, sa distribution, son spectre en fréquence et son spectrogramme temps-fréquence. La deuxième ligne montre le signal de cohérence entre le signal de frange noire et la puissance lumineuse dans l'interféromètre, puis la fonction de transfert (module et phase) entre le signal de frange noire et la puissance lumineuse entrant dans l'interféromètre. Sont présentées ensuite une distribution 2D montrant l'évolution de la position horizontale du haut de la suspension du miroir ouest ainsi que l'image du faisceau fournie par une caméra numérique en sortie de l'interféromètre.

Enfin, petit détail qui a son importance : à chaque utilisation du bouton "Start", tous les paramètres du dataDisplay (derniers graphiques réalisés, source de données utilisée, opérations réalisées sur les signaux...) sont sauvegardés dans un fichier de configuration qui peut être ensuite passé sur la ligne de commande lors d'un nouveau démarrage du dataDisplay. Cette possibilité de démarrer un dataDisplay dans une configuration prédéterminée a été rapidement exploitée pour créer une bibliothèque de configurations standards régulièrement utilisées en salle de contrôle.

5.1.1 Exemples d'utilisation du dataDisplay

Le dataDisplay a tout d'abord été développé pour permettre une visualisation en ligne des données. Cela consiste à recevoir les données à travers le réseau Ethernet en se connectant sur un des points d'accès décrit au paragraphe 4.7.2. L'utilisateur choisit le point d'accès sur lequel il souhaite se connecter. Le dataDisplay reçoit alors par le réseau Ethernet des frames de quelques dizaines de kOctets ne contenant que les signaux souhaités. La figure 5.1 montre un exemple de visualisation des données en ligne qui a permis pendant le run de septembre 2006 de suivre l'évolution du signal de frange noire, sa cohérence avec la puissance lumineuse dans l'interféromètre, la position de la suspension d'un miroir de l'interféromètre et la forme du faisceau de frange noire vue par une caméra numérique.

Le dataDisplay s'est aussi rapidement révélé très utile pour faire une première analyse des données écrites sur disque. En lisant directement les fichiers de données ou en utilisant les bases de données élémentaires de Virgo (fichiers ffl), le dataDisplay accède directement aux signaux à l'intérieur de chaque fichier de données en quelques dizaines de millisecondes. L'accès différé aux données a été souvent utilisé pour comparer les caractéristiques d'un même signal à deux instants différents. La figure 5.2 est un exemple d'utilisation du dataDisplay pendant le commissioning, où sont comparées des données prises à deux instants différents. Elle montre que l'isolateur de Faraday installé sur le banc d'injection de l'interféromètre fonctionne de la même façon avec une puissance lumineuse incidente de 4.5 Watts (courbes violettes) ou de 3 Watts (courbes noires).

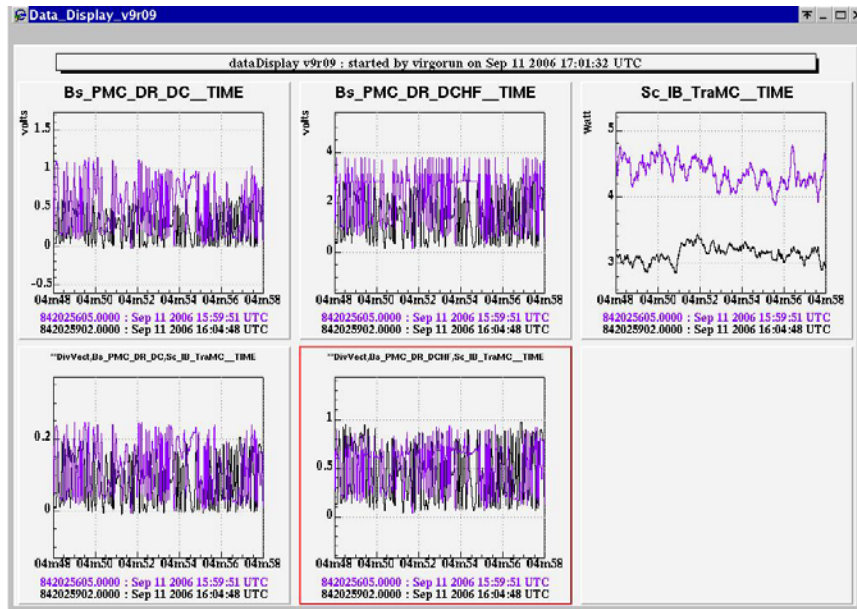


FIG. 5.2 – Exemples d'utilisation du dataDisplay pendant le commissioning de Virgo. Cette figure montre que l'isolateur de Faraday installé sur le banc d'injection de l'interféromètre fonctionne de la même façon avec une puissance lumineuse incidente de 4.5 Watts (courbes violettes) ou de 3 Watts (courbes noires). *Sc_IB_TraMC* est la puissance lumineuse incidente, *Bs_PMC_DR_DC* et *Bs_PMC_DR_DCHF* sont les puissances lumineuses revenant de l'interféromètre vers le laser.

Il est apparu aussi intéressant de pouvoir visualiser les données depuis les laboratoires de

la collaboration Virgo sans avoir à les copier localement. C'est à dire pouvoir lire à distance les données stockées sur les disques de Virgo. J'ai réalisé un utilitaire appelé "dataSender" qui permet à un dataDisplay démarré localement dans un laboratoire de lire les données stockées sur le site quasiment comme si les disques étaient présents au laboratoire. Le dataSender a permis d'améliorer considérablement le confort de la visualisation à distance des données.

La figure 5.3 montre un exemple d'utilisation du dataSender. Les données visualisées sont le signal de frange noire et la quantité "h" au moment où un bruit transitoire a été détecté. Le fait que la source de données soit le dataSender ne se voit évidemment pas sur les graphiques.

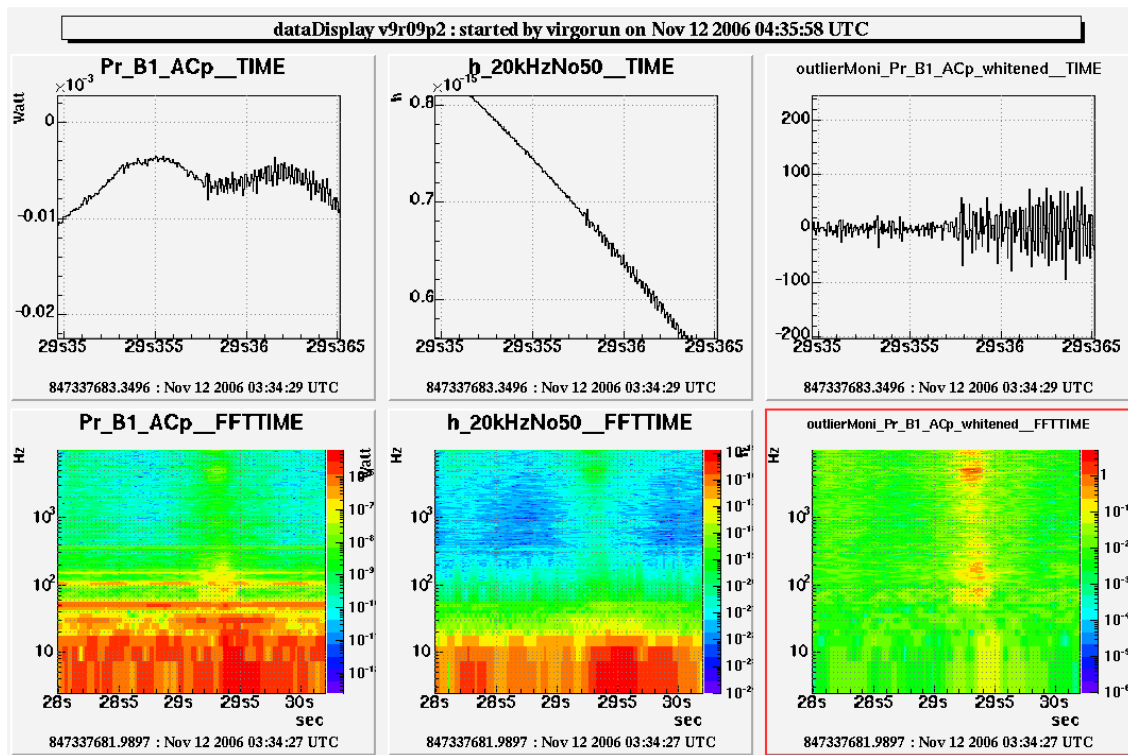


FIG. 5.3 – Exemples d'utilisation du dataDisplay dans l'analyse d'une prise de données réalisée en novembre 2006 (WSR5). La première ligne montre le signal de frange noire en sortie de l'interféromètre en fonction du temps, le signal "h" en fonction du temps et le signal de frange noire "blanchi" en fonction du temps. La deuxième ligne montre les spectrogrammes correspondants où l'on observe assez nettement le signal transitoire.

5.1.2 Caractéristiques techniques

Le dataDisplay utilise uniquement des codes "open source" : une interface graphique créée avec la librairie Xforms¹, une gestion des transferts de données basée sur les librairies de Virgo "Fr", "Fd", et "Cm" et une visualisation des graphiques basée sur la librairie Root² développée au CERN. Au fur et à mesure des changements d'Operating System réalisés dans Virgo ou de

¹<http://world.std.com/~xforms>, <http://download.savannah.nongnu.org/releases/xforms>

²<http://root.cern.ch>

l'intérêt que le dataDisplay a suscité dans d'autres expériences de recherche d'ondes gravitationnelles comme LIGO ou AURIGA, le dataDisplay a été compilé et utilisé sous OSF1 v5, Mac OSX, SunOS, Linux RedHat 7.2, Linux RedHat 9 ou Scientific Linux 4.2 (une tentative de compilation sous Cygwin n'a pas encore abouti).

L'utilisation de Xforms a permis de créer ou de modifier rapidement les panneaux de l'interface graphique du dataDisplay et de gérer de façon relativement simple leur mise à jour et leur interfaçage avec le reste du code. Toutes les interfaces graphiques du dataDisplay sont basées sur un ensemble de boutons (pour agir) et un ensemble de listes (pour sélectionner) qui permettent de changer la configuration des graphiques et le type de données visualisées. Les figures 5.4 et 5.5 montrent les deux principales fenêtres graphiques du dataDisplay. La première affiche les informations principales et sert de point d'entrée à toutes les fonctionnalités du dataDisplay. La seconde permet de sélectionner des signaux, de choisir les graphiques à visualiser et d'éditer leurs paramètres.

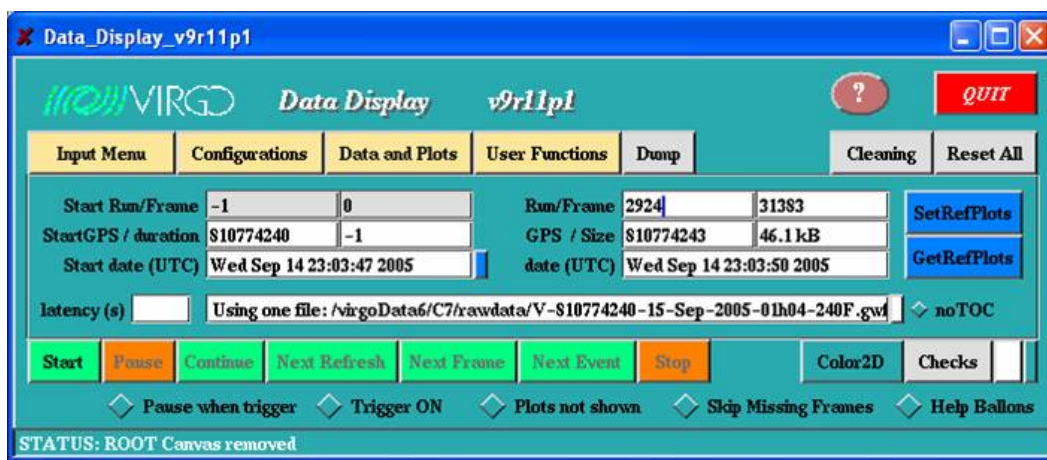


FIG. 5.4 – Panneau principal du dataDisplay. Il affiche les informations concernant les données en cours de lecture et donne accès aux autres panneaux. Il permet aussi de choisir la source des données et le temps GPS de début de lecture.

L'utilisation de la librairie Root dans le dataDisplay permet de modifier assez facilement les caractéristiques des graphiques réalisés, de modifier leur forme et leur position, de changer les titres, d'ajouter des commentaires, etc... Dans le développement du dataDisplay, plusieurs fonctionnalités nouvelles, qui n'existaient pas dans Root, ont été ajoutées comme la mise à jour du temps GPS du graphique, le Zoom Multiple, la superposition de courbes intégrales ou la sauvegarde des courbes au format ASCII.

D'autre part, grâce au chargement dynamique de librairie autorisé par Root, le dataDisplay offre la possibilité de faire des opérations sur les données et d'envoyer le résultat aux fonctions de visualisation graphique. Par exemple, l'utilisateur peut visualiser la transformée de Fourier de $\frac{(signal1+signal2)^2}{signal3}$, où signal1, signal2 et signal3 sont trois signaux fournis par l'acquisition de données de Virgo.

Root a par contre un inconvénient pour une application souhaitant fonctionner en ligne : le Canvas Root contenant les graphiques est en mode bitmap et le rafraichissement des graphiques est donc assez lent. Le dataDisplay n'est donc pas optimisé pour la vitesse, notamment lorsque la

visualisation se fait au travers d'une connexion ssh. Les derniers tests réalisés ont montré toutefois que le dataDisplay est capable de visualiser en ligne, sur un PC à 2.4 GHz, 16 transformées de Fourier de 65536 points sur des signaux échantillonnés à 20 kHz.

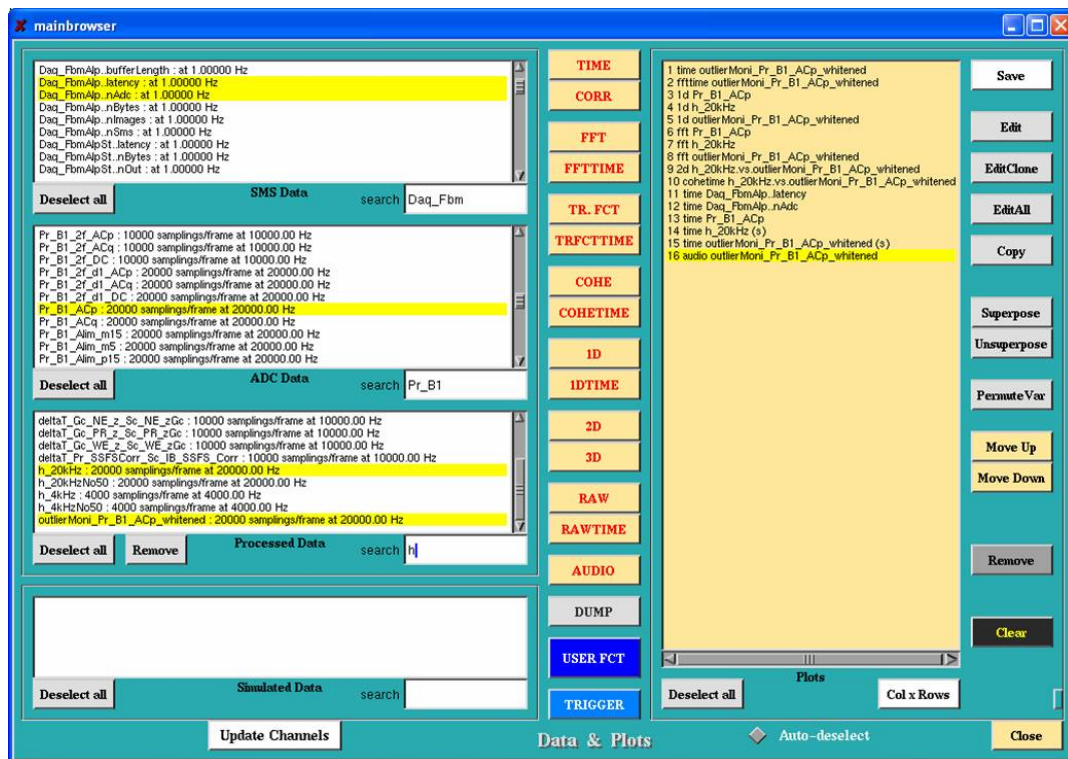


FIG. 5.5 – *Panneau de gestion des canaux et des graphiques du dataDisplay. Il permet de visualiser la liste des canaux disponibles dans chaque frame, de choisir certains canaux et le type de graphiques visualisés, puis de gérer la superposition des graphiques ou la modification des paramètres de chacun d’eux.*

5.1.3 Perspectives et améliorations du dataDisplay

Le dataDisplay ne peut lire actuellement que des données au format frame, c'est à dire toutes les données de Virgo mais aussi les données des autres expériences de détection d'ondes gravitationnelles qui ont adopté ce même format (LIGO, GEO600, TAMA300, AURIGA...). J'envisage de donner au dataDisplay la capacité d'autres formats de données utilisés dans LIGO et certains formats de données standards utilisés en astrophysique (netCDF, ...)

Le dataDisplay est depuis plusieurs années utilisé de façon standard et permanente en salle de contrôle. C'est à la fois un outil de surveillance en ligne du détecteur et une aide précieuse pour faire une première analyse des signaux de l'interféromètre. La souplesse de l'acquisition de données et les fonctionnalités du dataDisplay ont permis depuis 2001 d'améliorer l'efficacité du commissioning de Virgo, notamment de mener à bien les premiers contrôles locaux et globaux de l'interféromètre. De plus, durant toute la phase de "commissioning", notamment lors de chaque prise de données, le dataDisplay a été souvent utilisé par la collaboration Virgo dans l'analyse

du comportement du détecteur et la recherche des sources de bruits.

Le dataDisplay est cependant loin d'être parfait. De nombreuses améliorations restent à apporter pour rendre le code plus robuste face à des conditions d'utilisation erronée, ainsi que pour gérer la synchronisation des graphiques ou améliorer l'interface sonore. D'autre part, l'interface avec l'utilisateur pourrait certainement être rendue plus intuitive et conviviale. La fonctionnalité "trigger" aurait aussi besoin d'être améliorée. Elle devrait par exemple donner la possibilité de faire une fonction de transfert entre deux signaux seulement lorsque la cohérence entre deux autres signaux est suffisamment élevée dans une certaine bande de fréquence. Elle devrait permettre aussi de visualiser facilement une liste d'événements sélectionnés par l'analyse en ligne.

D'une manière générale, il pourrait être également intéressant de faire évoluer le dataDisplay vers l'analyse des données pour en faire un outil général de visualisation et de traitement du signal moins riche que matlab mais basé sur une interface graphique permettant de créer rapidement les variables et les graphiques souhaités. Ce développement passerait par la possibilité d'opérations plus complexes sur les signaux (filtrages passe-bande, fonction de cohérence, rms sur une bande de fréquence, etc...) et la possibilité de faire des opérations entre plusieurs graphiques (par exemple la différence entre deux distributions ou le rapport entre deux fonctions de cohérence).

5.2 La qualification des données

Une première façon de surveiller en ligne le détecteur est de visualiser les signaux susceptibles de fournir des informations sur l'état des boucles de contrôle, des photodiodes de détection, des suspensions des miroirs, etc... C'est ce que fait le dataDisplay. Un autre besoin est apparu également dès le début du commissioning de Virgo : celui d'un ensemble de quantités discriminantes ("flags" de qualité) qui caractérisent l'état du détecteur et son niveau de bruit. Ces "flags" de qualité sont enregistrés dans les données de Virgo et visualisés en salle de contrôle. Ils donnent une vue d'ensemble de l'état des différents sous-systèmes et permettent une réaction rapide en cas de dysfonctionnement du détecteur. Ils jouent aussi un rôle important en aidant à sélectionner les segments de données les plus intéressants pour l'analyse des données.

Des outils logiciels ont été développés pour configurer de façon simple des algorithmes de qualification des données et pour générer ces "flags" de qualité. Une architecture utilisant les outils du DAQ a été mise en place pour ce type de surveillance du détecteur.

5.2.1 Les algorithmes de qualification des données

Pour chaque sous-système du détecteur Virgo (suspensions, photodiodes, injection du faisceau laser, surveillance de l'environnement, alignement de l'interféromètre, etc...) un algorithme surveille les signaux adéquats et crée un "flag" de qualité. Ce "flag" est déterminé par un ensemble de "flags" secondaires, chacun d'eux étant lui-même déterminé par un ensemble de conditions sur les signaux. Depuis le début du commissioning, plusieurs algorithmes de surveillance du détecteur ont été mis en ligne :

- **TiMoni** : Surveillance du système de "timing"

- **DetMoni** : Surveillance des photodiodes de détection et de l’alignement du Mode-Cleaner de sortie.
- **SuspMoni** : Surveillance de la position et de l’orientation des suspensions anti-sismiques.
- **SuspMoniEB** : Surveillance de la position et de l’orientation des suspensions en bout de bras Nord et Ouest.
- **EnvMoni** : Surveillance de l’environnement et de l’état des capteurs.
- **AliMoni** : Surveillance de l’alignement des faisceaux dans les bras Nord et Ouest.
- **InjMoni** : Surveillance de l’alignement du banc d’injection et du système d’injection du laser.
- **LockMoni** : Surveillance des contrôles de l’interféromètre et des puissances dans les cavités.
- **VacuumMoni** : Surveillance des tubes et des enceintes à vides.
- **InfraMoni** : Surveillance des infrastructures (alimentation UPS et climatisation).
- **ServersMoni** : Surveillance de l’état des serveurs du DAQ et des serveurs impliqués dans les contrôles de l’interféromètre.

Le tableau 5.1 montre un extrait de la configuration de SuspMoni qui assure la surveillance des suspensions des miroirs. Un "flag" de qualité global (Overall) y est défini à partir d’autres flags de qualité. Dans cet exemple, les bits 1,2 et 3 du flag "Overall" sont définis par l’état des flags PR_ID, PR_LC et PR_Vert. Puis , les bits 1 et 2 du flag PR_ID sont eux-mêmes définis par une condition sur la moyenne et le rms du signal Sa_PR_F0_xLvdt (position de la suspension du miroir de recyclage).

```
QCFLAG Overall 1 PR_ID "PR inertial damping open or too noisy"
QCFLAG Overall 2 PR_LC "PR local control open or too noisy"
QCFLAG Overall 3 PR_Vert "PR Vertical Control not working properly"
QCFLAG Overall 4 PR_F7 "PR Filter 7 too noisy"
QCFLAG Overall 5 PR_TE "PR temperature unstable"
...
/***** Power Recycling tower *****/

MONITOR * PR_ID 1 "-20;mean(Sa_PR_F0_xLvdt_50Hz,10);20" "x Loop open or too noisy"
MONITOR * PR_ID 2 "rms(Sa_PR_F0_xLvdt_50Hz,10);20" "x Loop open or too noisy"
MONITOR * PR_ID 3 "-20;mean(Sa_PR_F0_zLvdt_50Hz,10);20" "z Loop open or too noisy"
MONITOR * PR_ID 4 "rms(Sa_PR_F0_zLvdt_50Hz,10);20" "z Loop open or too noisy"
MONITOR * PR_ID 5 "-20;mean(Sa_PR_F0_tyLvdt_50Hz,10);20" "ty Loop open or too noisy"
MONITOR * PR_ID 6 "rms(Sa_PR_F0_tyLvdt_50Hz,10);20" "ty Loop open or too noisy"
...
MONITOR 1-9 PR_LC 17 "brms(Gx_PR_tx,40,2,0.55,0.65);0.6" "oscillation along x @ 600mHz"
MONITOR 1-9 PR_LC 18 "brms(Gx_PR_ty,40,2,0.55,0.65);0.6" "oscillation along x @ 600mHz"
MONITOR 1-9 PR_LC 19 "brms(Gx_PR_z,40,2,0.55,0.65);0.8" "oscillation along z @ 600mHz"
...
MONITOR * PR_TE 1 "20.2;mean(Em..TESURE01,10);22.2" "Temp is fluctuating too much"
...
```

TAB. 5.1 – *Extrait de la configuration de l’algorithme SuspMoni qui surveille l’état des suspensions des miroirs de Virgo.*

L’évolution du commissioning et l’automatisation de la procédure de verrouillage de l’interféromètre ont très vite demandé que certaines des conditions définissant les "flags" de qualité

ne soient appliquées que pendant certaines étapes de la procédure de verrouillage. Ces étapes sont numérotées de 1 à 15 (voir paragraphe 3.3). Le premier paramètre après le mot clé MONITOR définit l'étape de la procédure automatique de verrouillage de l'interféromètre pendant laquelle s'applique la condition. Dans l'exemple de configuration montré par la figure 5.1, les conditions qui définissent les bits 17, 18 et 19 du flag PR_LC ne sont appliquées que pendant les étapes 1 à 9 de la procédure de verrouillage et les conditions qui définissent les bits 1 à 6 du "flag" PR_ID sont appliquées quelle que soit l'étape de la procédure de verrouillage.

5.2.2 Utilisation des "flags" de qualité

Les "flags" de qualité ainsi créés ont deux destinations. D'une part, avec une latence de quelques secondes, ils sont visualisés en salle de contrôle sous forme de "flags" rouges ou verts qui informent les opérateurs de tout problème détecté dans le comportement de l'interféromètre.

D'autre part, ils sont envoyés vers l'acquisition de données et enregistrés sur disque. Ils peuvent alors être utilisés pour aider à la détermination des segments de données acceptables pour une recherche d'ondes gravitationnelles. Un "flag" supplémentaire appelé "Science Mode" est généré depuis la salle de contrôle. La valeur de ce "flag" dépend actuellement de la décision de l'opérateur mais reste conditionnée par une remise à zéro automatique si l'interféromètre n'est pas verrouillé de façon stable (étape 12 de la procédure de verrouillage). Le flag "Science Mode" est utilisé avec d'autres informations générées par la reconstruction de h pour créer un "flag" de qualité principal utilisé par l'analyse de données pour un premier marquage des données. Les segments de données déterminés par ce "flag" de qualité principal sont ensuite éventuellement sous-segmentés en fonction des "flags" de qualité fournis par le système de qualification des données.

Detector Monitoring System v5r6 BETA				Mode = Adjusting		ITF State = 12 (locked for 1h 11mn)		Date/UTC: Wed Nov 8 17:08:06 2006 GPS: 847040900		Frame No: 19995 Latency: 4.76	
Alignment	Ali_PR		Ali_NI		Ali_NE		Ali_WI		Ali_WE		Servers
	Ali_Q1p		Ali_Q2		Ali_Q5		Ali_Q7		Ali_Q8		RIOs
Servers	TiServer	Daq50Hz	Storage	DaqMoni	DaqSusp		DMonitor		DaqDet	DaqTrend	
Detection	OB_ID	OB_LC	OB_Vert	OB_TE	OB_Guardians		OB_Servers		OB_RIOs		
	Gx_B1	Gx_B1p	Gx_B2	Gx_B5	Gx_B7		Gx_B8		Det_Servers		
	Pr	Lo	Vb	Sr	Pi		OMC		SFP		
Environment	Ce_Building		MC_Building		NE_Building		WE_Building		LaserLab		
	DetectionLab		NE_Bench		WE_Bench		External		Airplane		
Injection	IB_ID	IB_LC	IB_Vert	IB_TE	IB_Guardians		IB_Servers		IB_RIOs		Workstations
	MC_ID	MC_LC	MC_Vert	MC_TE	MC_Guardians		MC_Servers		MC_RIOs		PicoMotors
	RFC	f_mod_Err	Freq_Noise	SSFS	Laser		GxLa_RIO		LaDiode_RIO		Piezos
	IB_AA	MC_AA	MC_Power	MC_zControl		MC_Noise		BMS		BC_RIO	TStages
Locking	BS_Power	BS_2f_Acq_Power		B7_Power	BS_Power	Reallocation	TidalControl		Global_Control		SEA_activity
	BS_zCorr	PR_zCorr		NE_zCorr	WE_zCorr	GainAdj	CoilDrvMode		CoilRelay		WIND_activity
	DSP	Pr_Servers		Alp_Servers	DSP_Servers	Lo_Servers	test(please_ignore)				
Suspensions	PR_ID	PR_LC	PR_Vert	PR_F7	PR_TE	PR_Guardians		PR_Servers		PR_RIOs	
	BS_ID	BS_LC	BS_Vert	BS_F7	BS_TE	BS_Guardians		BS_Servers		BS_RIOs	
	NI_ID	NI_LC	NI_Vert	NI_F7	NI_TE	NI_Guardians		NI_Servers		NI_RIOs	
	NE_ID	NE_LC	NE_Vert	NE_F7	NE_TE	NE_Guardians		NE_Servers		NE_RIOs	
	WI_ID	WI_LC	WI_Vert	WI_F7	WI_TE	WI_Guardians		WI_Servers		WI_RIOs	
	WE_ID	WE_LC	WE_Vert	WE_F7	WE_TE	WE_Guardians		WE_Servers		WE_RIOs	
Vacuum	LinkValves		TubeValves			TowerServers			TubeServers		

FIG. 5.6 – Les "flags" de qualités visibles via le web en salle de contrôle. La première colonne contient les "flags" résumant l'état d'un sous-ensemble du détecteur. La couleur grise signifie que des données sont absentes et que, par conséquent, le flag n'a pu être déterminé. La couleur rouge signifie qu'au moins une des conditions qui maintiennent le flag vert n'est pas respectée. Par exemple le flag "Detection" est créé par DetMoni et ne sera vert que si l'ensemble de flags associés au système de détection (OB_ID, OB_LC, etc...) le sont.

5.2.3 Architecture de la qualification des données

Techniquement, tous les algorithmes mis en ligne pour la qualification des données sont connectés à la mémoire partagée d'un collecteur de frames (FbmDM) et utilisent tous la même implementation software, les mêmes librairies et la même syntaxe de configuration. Les "flags" de qualité générés par les algorithmes sont ensuite envoyés vers un nouveau collecteur de frames (FbmQc), qui les passe, via une seconde mémoire partagée au programme QcMoni. Ce programme centralise les informations et récupère également le flag "Science Mode". Puis, il transmet tous les "flags" de qualité vers l'acquisition de données grâce à un FdIOServer connecté à sa mémoire partagée. La figure 5.7 montre la configuration actuelle de cet ensemble. J'ai mis en place cette architecture et j'ai créé les outils logiciels associés.

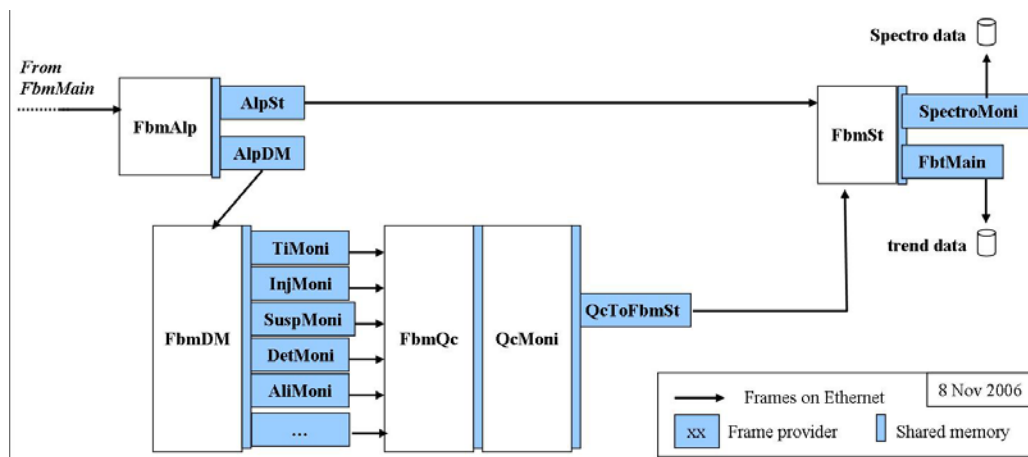


FIG. 5.7 – Configuration du système de surveillance en ligne du détecteur et de création de "flags" de qualité.

Les entrées et sorties sont gérées, comme dans l'acquisition de données, par la librairie "Fd". La création des différents algorithmes et la gestion de leurs "flags" de qualité se fait par un simple fichier de configuration, grâce à une librairie (MoniL) que j'ai développée pour générer les algorithmes et gérer les "flags" de qualité par un fichier de configuration.

J'ai développé cette librairie dans le but de fournir, en plus de la librairie "Fd", un moyen simple de configurer les algorithmes et de créer les "flags" de qualité. Chaque algorithme surveillant un sous-ensemble du détecteur est ainsi reconfigurable de façon simple sans toucher au code source lui-même.

Le dataDisplay et la qualification des données sont utilisés de façon standard en salle de contrôle et fournissent rapidement des informations sur le comportement de l'interféromètre. L'enregistrement des "flags" de qualité dans les données de Virgo n'est cependant pas encore pleinement exploité pour définir de façon précise les segments de données intéressants pour l'analyse. Ce sera un aspect de mon travail durant les mois à venir.

5.3 Surveillance Web

Le dataDisplay et la qualification des données sont deux outils de surveillance à faible latence (quelques secondes) qui permettent une intervention rapide en salle de contrôle. Un complément utile est fourni par un système de surveillance fonctionnant sur une échelle de temps de plusieurs heures et avec une latence de quelques minutes. Ce système utilise les données écrites sur disque et fournit des informations consultables à travers le web donc aussi hors salle de contrôle. Il donne un aperçu de l'état du détecteur mais aussi des résultats des traitements en ligne (courbe de sensibilité, spectrogrammes, événements détectés par des recherches en ligne de glitches ou de coalescences binaires...).

Ce dispositif se présente sous forme de graphiques actualisés périodiquement (toutes les 30mn ou toutes les 4mn selon le type de surveillance) et consultables par le Web¹. Il a été très

¹<http://wwwcascina.virgo.infn.it/MonitoringWeb/General>

utilisé pendant les prises de données de commissioning pour suivre l'évolution, sur plusieurs heures, de certains signaux caractérisant l'état de l'interféromètre (alignement des miroirs, puissance lumineuse dans la cavité de recyclage, puissance lumineuse transmise par le Mode Cleaner d'entrée, courbe de sensibilité, etc...). Ce système de surveillance par le web est aussi utilisé depuis septembre 2004 pour suivre la calibration du détecteur, pour montrer les spectrogrammes de plusieurs signaux ainsi que pour montrer le niveau de bruit dans différentes bandes de fréquence ou les résultats d'algorithmes en ligne.

Techniquement, cette surveillance par le web s'appuie sur un environnement software nommé VEGA et développé au LAPP pour l'analyse des données de Virgo [59][60]. VEGA réalise l'adaptation à Virgo de l'outil software Root développé au CERN par R. Brun et ses collaborateurs. Il permet la manipulation en ligne des données grâce aux fonctions de la librairie de gestion des frames "Fr" [48] et de la librairie de manipulation de vecteurs de données "Frv" [61]. Grâce à l'interpréteur C/C++ de Root, peuvent être construites des "macros VEGA" contenant des algorithmes de traitement et de visualisation des données.

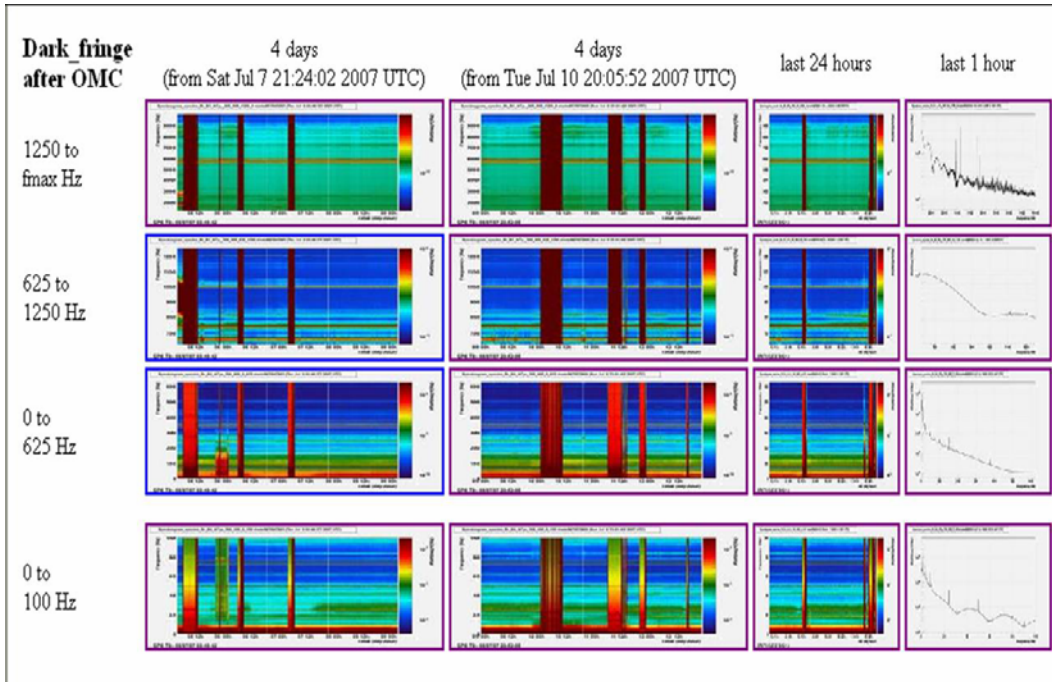


FIG. 5.8 – Les spectrogrammes de signaux importants du détecteur Virgo (ici le signal de frange noire) sont actualisés toutes les heures et consultables sur le web.

Dans le cadre de cette surveillance en ligne par le web, j'ai créé et je maintiens les macros VEGA et les pages web consacrées à la surveillance de l'acquisition de données ainsi que celles consacrées aux algorithmes de surveillance du bruit du détecteur. J'ai, de plus, développé un programme (SpectroMoni) qui calcule en ligne les densités spectrales de plusieurs signaux et une macro VEGA qui utilise ces données pour montrer les spectrogrammes sur plusieurs jours des signaux les plus intéressants pour le commissioning (figure 5.8).

La surveillance en ligne du détecteur et des données est un outil important pour le com-

missioning, pour les futures prises de données de longue durée et pour l'analyse des données. Les informations fournies en salle de contrôle ou sur le web ont encore besoin d'évoluer mais fournissent déjà une vue d'ensemble assez complète de l'état du détecteur. La qualification des données y contribue tout en fournissant des "flags" utilisables par l'analyse de données.

Chapitre 6

Analyse en ligne du bruit du détecteur. Recherche de signaux transitoires

Lorsque l'interféromètre Virgo est verrouillé dans une configuration stable dite "Science Mode", le signal de frange noire enregistré par l'acquisition de données est la somme de tous les bruits instrumentaux ou environnementaux du détecteur (en particulier ceux décrits au paragraphe 3.2). Parmi tous ces bruits, certains sont permanents et stationnaires, d'autres sont permanents mais non-stationnaires (par exemple le rms du bruit fluctue au cours du temps), d'autres encore ne sont que transitoires. Ces deux dernières catégories de bruits affectent la stationnarité du signal de frange noire sur différentes échelles de temps et sont un inconvénient majeur pour la sensibilité du détecteur et pour les algorithmes de recherche d'ondes gravitationnelles. La recherche de signaux transitoires et l'étude de la stationnarité du bruit du détecteur sont donc importantes pour les activités de commissioning et la recherche de signaux d'ondes gravitationnelles.

6.1 Cadre général

Sur de grandes échelles de temps (quelques secondes à quelques heures), la stationnarité du signal de frange noire est affectée par exemple par des fluctuations d'alignement des miroirs dans l'interféromètre, des fluctuations de température des suspensions ou une sismicité éolienne et maritime. Sur de plus courtes durées (quelques millisecondes à quelques secondes), la stationnarité du signal de frange noire est affectée par des signaux transitoires d'origine terrestre (c'est à dire instrumentaux ou environnementaux). Ceux-ci peuvent être liés à un dysfonctionnement de l'électronique, à une poussière passant dans le faisceau, à une secousse sismique, etc...

Parce qu'on ne connaît a priori ni la durée ni la forme des signaux transitoires, il est difficile d'en identifier l'origine. Virgo tente de détecter des signaux astrophysiques d'amplitude très faible provenant de sources astrophysiques rares et il est difficile de distinguer un signal transitoire astrophysique (voir paragraphe 2.2) d'un signal transitoire terrestre. Les bruits transitoires terrestres peuvent donc générer de fausses alarmes dans les algorithmes de recherche d'ondes gravitationnelles. Il est donc nécessaire d'en identifier la source ou, au moins, d'identifier ces

signaux comme étant d'origine terrestre. Comme on le voit, la recherche de signaux d'ondes gravitationnelles et la recherche de signaux transitoires instrumentaux ou environnementaux sont étroitement liées.

La démarche suivie est à priori la suivante :

- Le flag "Science Mode" et un ensemble de flags de qualité de premier niveau permet de sélectionner les segments de données sur lesquels vont être recherchés les bruits transitoires.
- Un ou plusieurs algorithmes fournissent un ensemble d'événements détectés sur le signal de frange noire.
- Si l'origine du bruit transitoire a été identifiée, on en élimine la source.
- Si la source n'a pu être identifiée ou ne peut être éliminée, on recherche des bruits transitoires sur des canaux auxiliaires afin de construire des vetos efficaces pour exclure ces bruits des analyses d'ondes gravitationnelles.
- Les vetos retenus définissent une qualification des données de deuxième niveau et éliminent une partie des signaux transitoires détectés sur la frange noire.
- Tout signal transitoire détecté par un algorithme de recherche d'ondes gravitationnelles et n'ayant pu être exclu par un veto devient un candidat potentiel d'onde gravitationnelle. Il ne peut alors être exclu que par une analyse en coïncidence avec d'autres détecteurs.

Sont décrits dans ce chapitre les types de signaux recherchés puis les algorithmes utilisés dans Virgo pour la détection de ces signaux, en ligne ou en différé. Je décris également l'architecture que j'ai mise en place pour faire fonctionner en ligne ces algorithmes puis je montre quelles informations ont apporté ces algorithmes en ce qui concerne la stationnarité du bruit du détecteur. Je termine par une discussion sur les perspectives de ce type d'analyse.

6.2 Les signaux transitoires dans Virgo

La difficulté d'une recherche de signaux transitoires est d'abord liée à la forme à priori inconnue du signal et à la diversité des origines possibles de ce signal. Durant le commissioning du CITF et de Virgo, de nombreux signaux transitoires ont été observés. Ces signaux transitoires ont toutes sortes de formes. Leur durée varie de quelques dizaines de microsecondes à plusieurs secondes. Leur origine peut être liée à des dysfonctionnements du détecteur ou à des bruits environnementaux, qui peuvent se traduire par l'apparition d'une sinusoïde amortie suite à une secousse sismique ou l'apparition d'une fluctuation rapide de la puissance détectée suite au passage d'une poussière dans le faisceau, etc... Leur origine peut également être liée au dysfonctionnement d'un élément de l'acquisition de données ou d'un élément des boucles de contrôle, pouvant se traduire par l'apparition d'une valeur incorrecte sur un échantillon de signal numérisé ou une fluctuation brutale d'un signal de correction envoyé sur l'actionneur d'un miroir. Tous ces signaux transitoires n'ont à priori aucune caractéristique permettant de les différencier de signaux d'ondes gravitationnelles. C'est ce qu'illustre les figures 6.1 et 6.2 : la première montre les quatre types de signaux injectés dans l'interféromètre pendant les prises de données afin de simuler un signal d'onde gravitationnelle, la seconde montre quatre exemples de signaux transitoires terrestres observés dans Virgo.

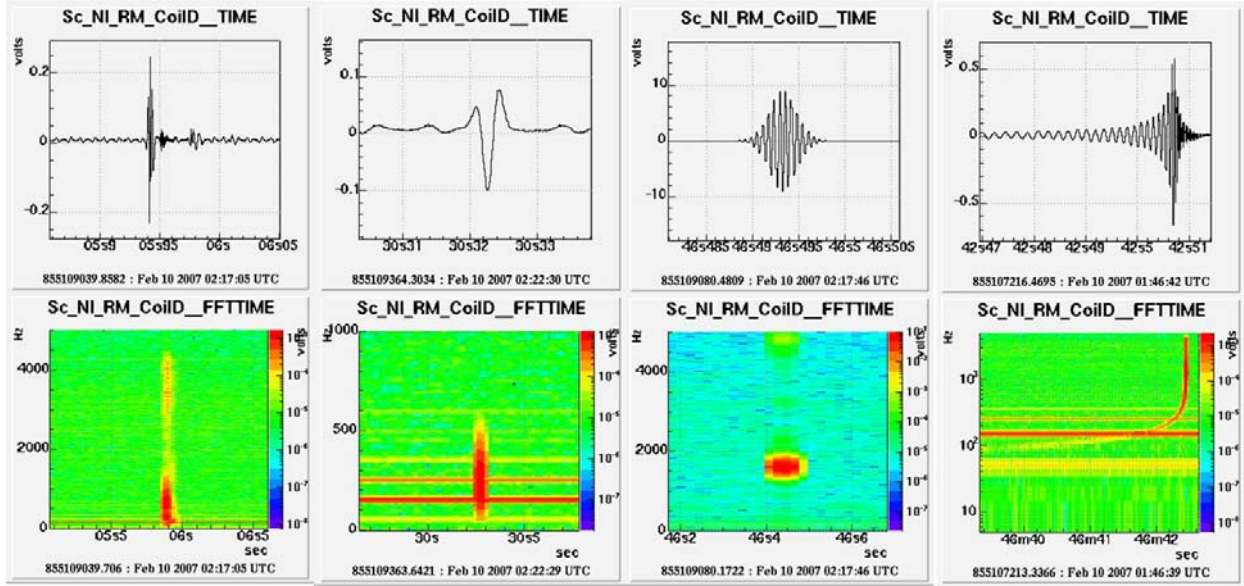


FIG. 6.1 – Les quatre types de signaux injectés dans l’interféromètre pendant les prises de données afin de simuler une onde gravitationnelle. De gauche à droite : un signal d’onde gravitationnelle de supernovae issu de [37], un signal transitoire gaussien, un signal transitoire sinusoïdal d’enveloppe gaussienne, et un signal de coalescence binaire (dont la dernière milliseconde couvre une large bande de fréquence, à la manière d’un signal transitoire). Pour chacun de ces exemples sont montrés le signal et le spectrogramme temps-fréquence associé.

Durant le commissioning, la recherche des signaux transitoires terrestres s’est faite en deux temps :

- **Phase 1** : les algorithmes développés en un premier temps ont eu pour but de détecter des anomalies dans le fonctionnement du détecteur ou de l’acquisition des données. Il s’agissait d’algorithmes simples utilisant des seuils de déclenchement élevés afin de trouver les signaux transitoires les plus intenses, d’en identifier l’origine puis d’en éliminer la source. Cette première phase s’est nourrie des connaissances acquises pendant le commissioning et a été, en retour, à l’origine d’améliorations apportées à l’interféromètre.
- **Phase 2** : depuis un an environ, la recherche de signaux transitoires évolue vers la détection d’événements en coïncidence entre le signal de frange noire et un ou plusieurs signaux auxiliaires (signaux des boucles de contrôle ou signaux de surveillance de l’environnement). Elle utilise des algorithmes plus élaborés et des seuils de déclenchement plus faibles afin de fournir des vetos aux analyses qui recherchent des signaux d’ondes gravitationnelles. Ces vetos permettraient d’éliminer, en amont des analyses, certains segments de données ou d’éliminer, en aval, certains des événements sélectionnés par les algorithmes de recherche d’ondes gravitationnelles. Ce travail est un complément incontournable de la qualification des données décrite au paragraphe 5.2.

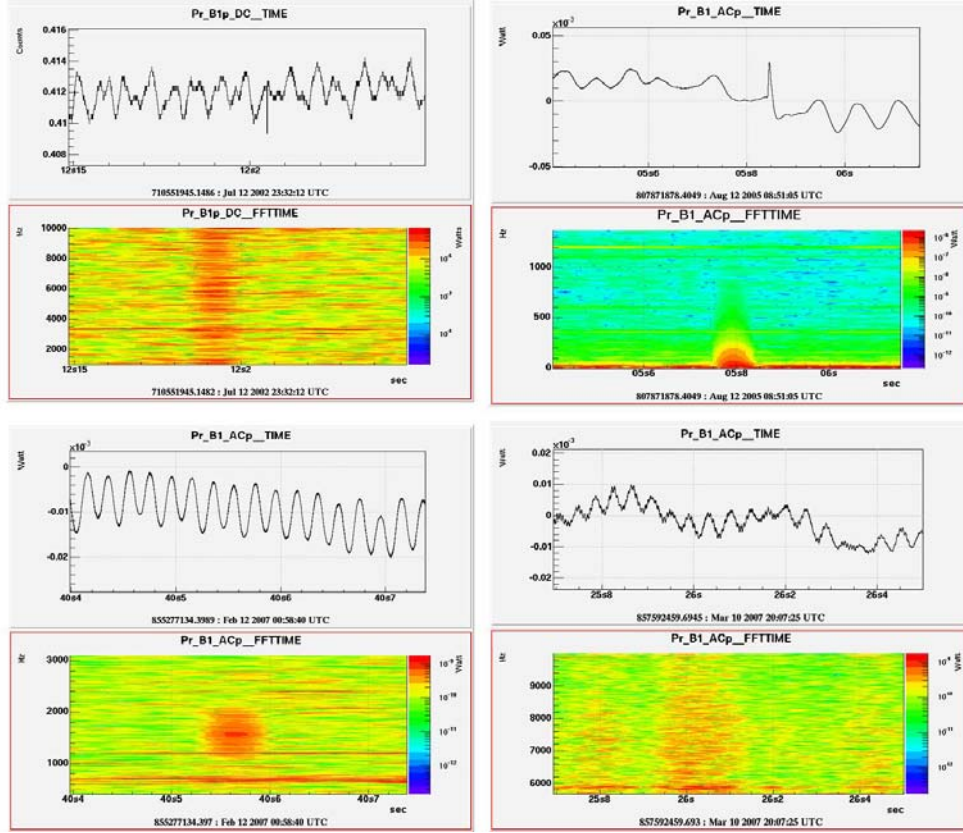


FIG. 6.2 – Quatre exemples de signaux transitoires détectés pendant les prises de données du CITF ou de Virgo. Pour chacun de ces exemples sont montrés le signal de frange noire et le spectrogramme temps-fréquence associé. Ces signaux transitoires ont des amplitudes différentes, ne durent au plus qu'une centaine de millisecondes et se localisent dans différentes bandes de fréquence.

6.3 Les algorithmes de recherche de signaux transitoires

Tout en continuant la mise en place de l'acquisition de données et le développement de la surveillance en ligne du détecteur, j'ai participé à la phase 1 de la recherche de signaux transitoires dans les données des runs techniques du CITF et des runs de commissioning de Virgo. Par la suite, j'ai été responsable de la mise en ligne de plusieurs algorithmes qui étudient le bruit du détecteur et recherchent des signaux transitoires.

Je présente ci-dessous quatre de ces algorithmes, parmi lesquels sont plus particulièrement mis en lumière deux d'entre eux : glitchMoni (que j'ai développé) et outlierMoni (au développement duquel j'ai participé).

6.3.1 glitchMoni

J'ai tout d'abord développé un algorithme relativement simple, "glitchMoni", orienté vers la détection de variations du signal sur de courtes échelles de temps (moins d'une milliseconde).

Le but était la détection de brefs signaux transitoires (appelés "glitches") qui pourraient provenir de problèmes de numérisation ou plus généralement de problèmes optiques ou électroniques plutôt que mécaniques. La procédure de l'algorithme est la suivante :

1. Le signal d'entrée (éventuellement sous-échantillonné afin de pouvoir détecter des signaux transitoires de plus longue durée) est filtré par un filtre passe-haut rudimentaire (différence entre deux échantillons consécutifs) afin d'éliminer les variations basses fréquence et rendre donc plus stable la moyenne et le rms glissants. Le résultat est un signal $F(t)$.
2. L'algorithme calcule ensuite une moyenne et un rms glissants $M(t)$ et $\sigma(t)$ du signal, sur une échelle de temps de quelques dizaines de millisecondes.
3. Puis, l'algorithme calcule la quantité $S(t) = (F(t) - M(t))/\sigma(t)$ et la compare à un seuil. Chaque fois que ce seuil est dépassé, l'algorithme a détecté un événement transitoire (pour limiter le nombre de déclenchements, j'ai choisi de placer ce seuil à 6).

La figure 6.3 illustre le fonctionnement de l'algorithme en montrant un signal transitoire détecté par glitchMoni, avec quatres courbes superposées : le résultat de l'algorithme $S(t)$, la moyenne glissante $M(t)$ et les écarts à la moyenne $M(t) - \sigma(t)$ et $M(t) + \sigma(t)$.

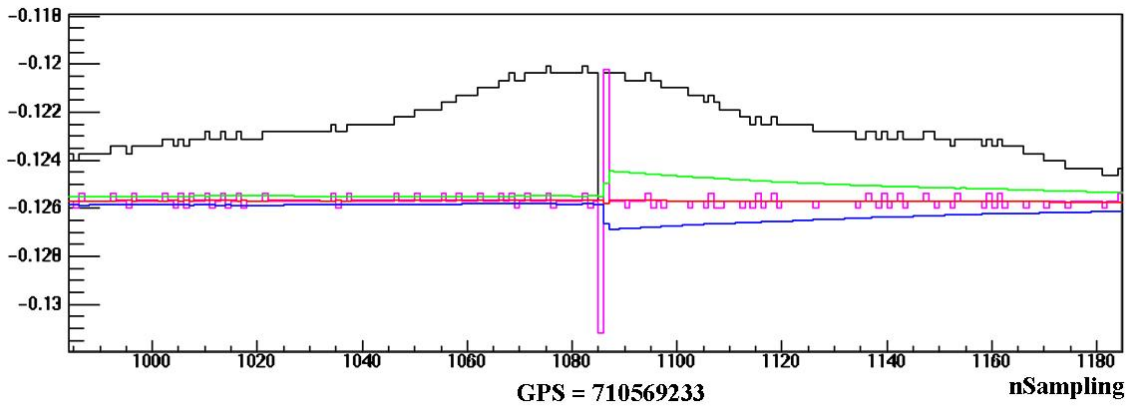


FIG. 6.3 – La courbe noire est le signal $F(t)$ où a été détecté le glitch. La courbe violette est le résultat $S(t)$ de glitchMoni; les courbes rouge, bleu et verte montrent la moyenne glissante $M(t)$ et les écarts de part et d'autre à un $\sigma(t)$. Pour des raisons pratiques, ces courbes ont été ramenées au niveau moyen du signal. A l'instant du glitch, on peut voir le signal $S(t)$ s'écarter de $M(t)$ de plusieurs fois la valeur de $\sigma(t)$.

Le but de l'algorithme était d'établir un premier catalogue des glitches et des dysfonctionnements qui pourraient en être la source, puis de remédier à ces dysfonctionnements. J'ai concentré cette recherche sur le signal de frange noire et sur les signaux utilisés pour les contrôles de l'interféromètre ou la surveillance de l'environnement. L'algorithme a été testé avec des signaux transitoires courts et élémentaires constitués de quelques échantillons (durée de 50 à 200 μs), placés aléatoirement dans un bruit de fond gaussien, avec un rapport signal sur bruit (SNR) égal ou supérieur à 6. Le résultat est une efficacité de détection supérieure à 98%.

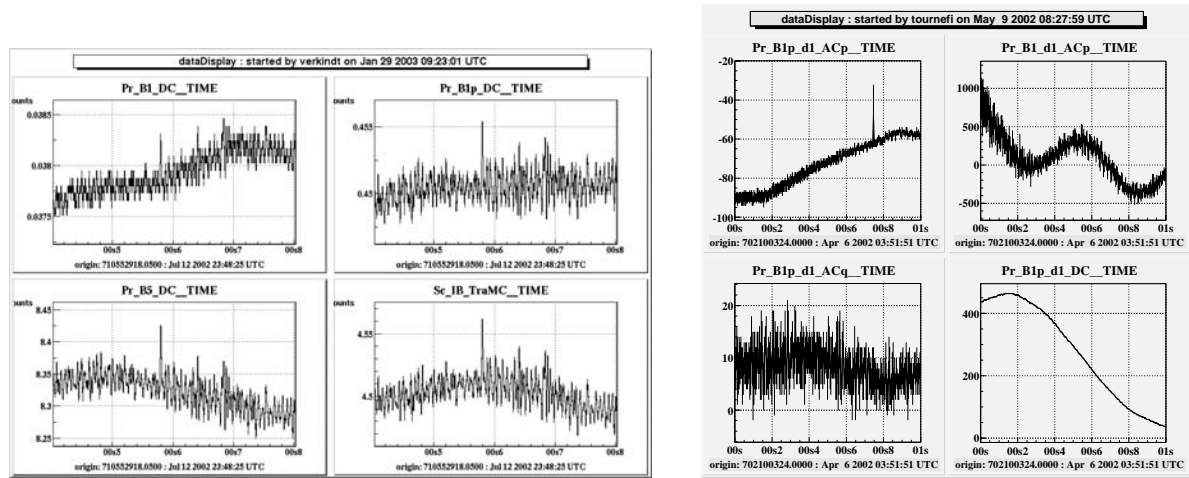


FIG. 6.4 – Exemples de glitch détecté par glitchMoni pendant les prises de données du CTF. **A gauche** : glitch en coïncidence sur le signal de puissance lumineuse de la frange noire (Pr_B1_DC et Pr_B1p_DC), sur le signal de puissance lumineuse dans l'interféromètre (Pr_B5_DC) et sur le signal de puissance lumineuse en sortie du système d'injection (Sc_IB_TraMC). Cette coïncidence indique que sa cause n'est pas d'origine électronique mais que c'est une fluctuation réelle de puissance lumineuse. Sa courte durée indique également que son origine est à rechercher du côté du laser plutôt que dans une fluctuation d'alignement des miroirs. **A droite** : le glitch est présent sur la voie ADC qui enregistre le signal de frange noire mais pas sur les autres voies qui enregistrent les signaux de la photodiode B1p (Pr_B1p_d1_ACq et Pr_B1p_d1_DC) ou de la photodiode B1 (Pr_B1_d1_ACq). C'est donc vraisemblablement un problème de numérisation du signal.

En collaboration avec E. Tournefier, j'ai détecté avec cet algorithme simple plusieurs types de signaux transitoires et identifié leur origine. Les modifications nécessaires ont été faites ensuite sur les éléments défectueux de l'interféromètre ou de la chaîne d'acquisition. Voici quelques exemples de "glitches" dont l'origine a été identifiée pendant les prises de données techniques du CTF :

- Des dysfonctionnements de la numérisation des signaux des photodiodes (figure 6.4 à droite).
- Des dysfonctionnements du code de DSP qui génère les signaux de correction appliqués aux miroirs.
- Une erreur sur la continuité du signal lorsque le contrôle de la frange noire passe de la photodiode B1 (après le Mode-Cleaner de sortie) à la photodiode B1p (avant le Mode-Cleaner de sortie).
- Des vibrations à 1800 Hz induites par le mouvement de montures motorisées utilisées pour aligner l'optique du banc de détection sur le faisceau.
- Des sursauts de puissance du faisceau provenant du laser temporaire utilisé pendant le commissioning du CTF (figure 6.4 à gauche).

La recherche de glitches avec cet algorithme a fait l'objet d'une note Virgo [62] et d'une présentation au workshop GWDAAW 2002 [63].

J'ai été, par la suite, responsable de la recherche de glitches dans les données de Virgo et j'ai donc consacré une partie de mon temps à poursuivre ce genre d'analyse sur les prises de données de commissioning. Les origines de plusieurs autres signaux transitoires (détectés sur des canaux auxiliaires) n'ont jamais été élucidées, ce qui n'est pas inhabituel pour ce genre d'analyse. La recherche de signaux transitoires s'oriente désormais vers la deuxième phase : trouver des canaux auxiliaires pour la mise en place de vetos. Dans cette perspective, lors des derniers runs de commissioning de Virgo, j'ai installé glitchMoni au sein de l'architecture que j'avais mise en place pour la surveillance en ligne du bruit du détecteur (voir paragraphe 6.4).

Entre 2005 et 2007, d'autres types de glitches ont été détectés ensuite par glitchMoni et par d'autres algorithmes plus performants comme outlierMoni.

6.3.2 outlierMoni

Depuis juin 2005, d'autres algorithmes développés par la collaboration Virgo sont venus enrichir cette recherche de signaux transitoires. J'ai participé notamment au développement et à la mise en ligne d'un algorithme nommé "outlierMoni", développé d'abord par E. Chassande-Mottin et qui examine la non-stationnarité du signal.

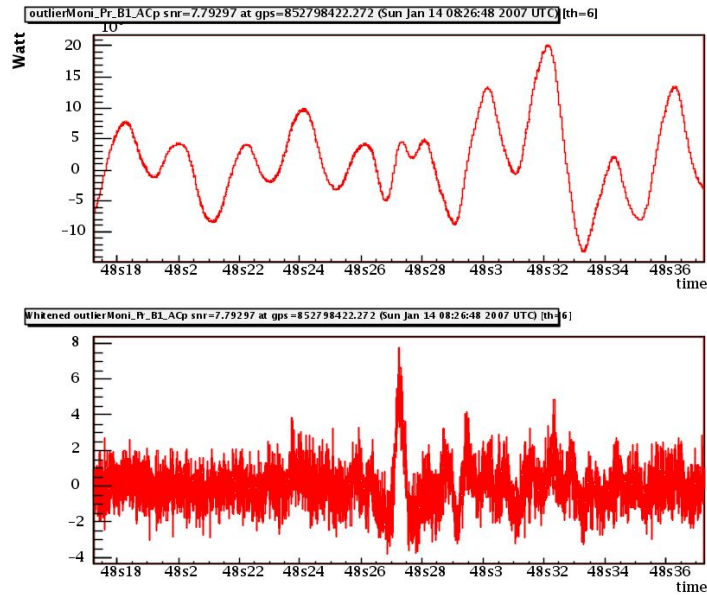


FIG. 6.5 – Glitch détecté par outlierMoni sur le signal de frange noire Pr_B1_ACp pendant la prise de données WSR7 en janvier 2007. La courbe du haut montre le signal de frange noire. La courbe du bas montre ce même signal une fois "blanchi" par outlierMoni.

Cet algorithme calcule une moyenne glissante du spectre du signal et divise le spectre courant par cette moyenne. Le résultat est un spectre blanchi dont la transformée de Fourier inverse fournit un signal où les événements transitoires ressortent du bruit. Cela s'explique par le fait que le spectre d'un signal transitoire est souvent assimilable à un bruit blanc sur une large bande de fréquence et que la transformée de Fourier inverse fournit un signal dont le rms est

proportionnel à l'amplitude du spectre blanc. Les figure 6.5 et 6.6 montrent deux exemples d'événements détectés par outlierMoni et qui n'ont pas été encore identifiés. La figure 6.7 montre un événement qui a été détecté à la fois par outlierMoni et par les algorithmes de recherche de coalescences binaires. C'est un exemple type de signal transitoire pouvant générer de fausses alarmes et pour lequel il n'est pas évident de trouver un veto. En revanche, si l'hypothèse d'une poussière passant dans le faisceau s'avère exacte, le nombre d'occurrences d'un tel signal transitoire peut être fortement réduite en enfermant le faisceau jusqu'à son arrivée sur les photodiodes. C'est ce qui a été fait en mars 2007.

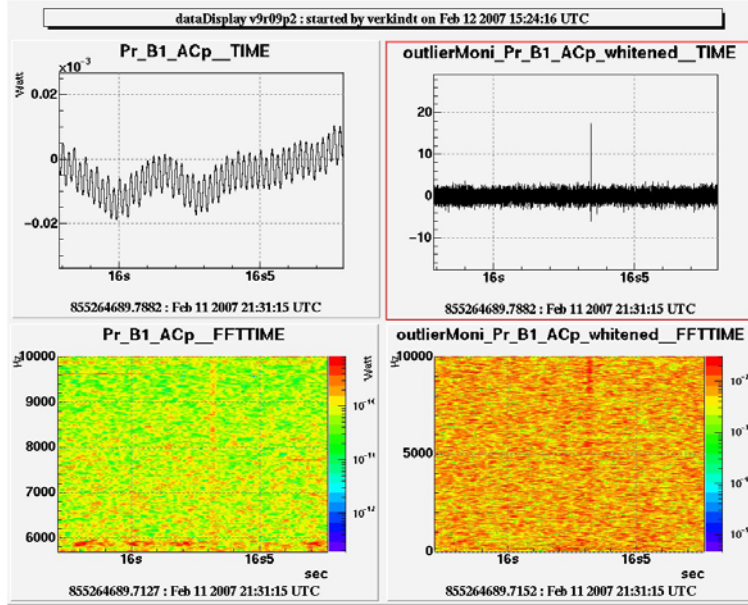


FIG. 6.6 – *Glitch détecté par outlierMoni sur le signal de frange noire Pr_B1_ACp pendant la prise de données WSR8 en février 2007. Les deux courbes du haut montrent le signal de frange noire (à gauche) et le signal blanchi (à droite). Les deux courbes du bas montrent leurs spectrogrammes associés où l'on peut voir la large bande de fréquence concernée par le signal transitoire.*

Il y a un an environ, je mettais outlierMoni en ligne dans la chaîne d'acquisition de données. Comme expliqué au paragraphe 6.4, ses résultats sont consultables par une page web mais n'ont pas encore été exploités pour construire des vetos pour l'analyse. Il est désormais épaulé par un autre algorithme, VirgoHACR, qui généralise dans le plan temps-fréquence le principe de fonctionnement de glitchMoni.

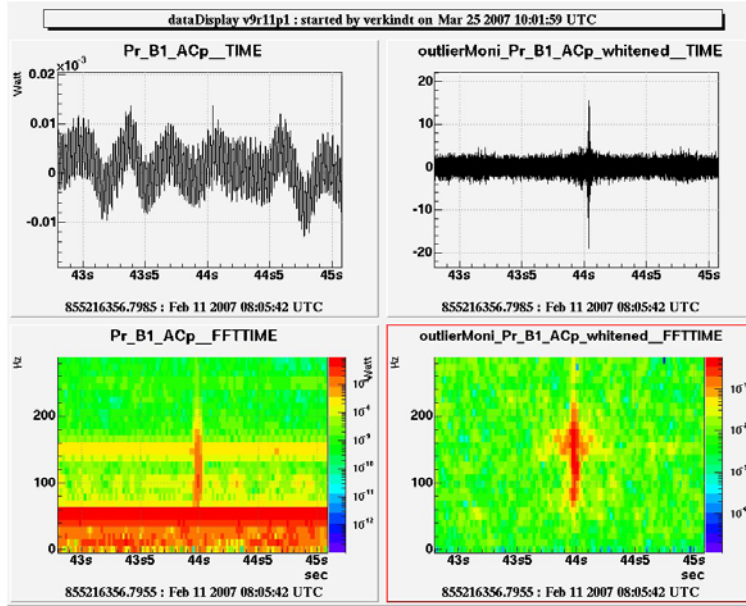


FIG. 6.7 – Événement détecté par les algorithmes de recherche en ligne de coalescences binaires pendant la prise de données WSR8 en février 2007. Cet événement a également été détecté par outlierMoni. Plusieurs événements de ce type ont été détectés pendant la prise de données et semblent pouvoir être associés à des poussières passant dans le faisceau au niveau du banc de détection externe qui supporte les photodiodes. Les 4 courbes montrent le signal de frange noire, le signal blanchi et leur spectrogrammes associés où l'on peut voir la bande de fréquence (80 Hz-200 Hz) concernée par le signal transitoire.

6.3.3 VirgoHACR

En mars 2007, j'ai eu l'occasion de mettre en ligne un nouvel algorithme dont le principe a été initialement développé par la collaboration GEO600. Cet algorithme recherche des signaux transitoires dans le plan temps-fréquence.

S'intéressant à des signaux brefs, il se concentre sur la partie haute fréquence de ce plan et n'a donc pas besoin d'une grande résolution en fréquence. VirgoHACR calcule donc à chaque instant t des transformées de Fourier $F(t, f)$ sur 50 ms de données, puis calcule, sur une durée configurable et pour chaque fréquence, une moyenne glissante $M(f) = \overline{F(t, f)}$ et une variance glissante $\sigma^2(f) = \overline{(F(t, f) - M(f))^2}$. Enfin, il compare chaque valeur $F(t, f)$ du plan temps-fréquence à la moyenne $M(f)$ puis normalise par la variance. Le résultat $S(t, f) = (F(t, f) - M(f))^2 / \sigma^2(f)$ est comparé à un seuil $S1$. Si ce seuil est dépassé, VirgoHACR tente de fabriquer un cluster autour de ce point en cherchant les points adjacents (t', f') pour lesquels $S(t', f')$ est supérieur à un seuil $S2 < S1$. Ceci permet d'estimer plus précisément la localisation temps-fréquence de l'événement détecté.

Le résultat est une information plus précise et plus complète que celle fournie par glitchMoni, notamment parce que VirgoHACR permet, pour des signaux transitoires répétés, d'estimer la bande de fréquence incriminée et la périodicité de ces événements (figure 6.8). Cet algorithme,

développé dans Virgo par G. Vajente, a déjà fourni des résultats montrant par exemple que certains bruits transitoires à haute fréquence sont liés à l'excitation de la résonance à 0.6 Hz de la suspension de la séparatrice.

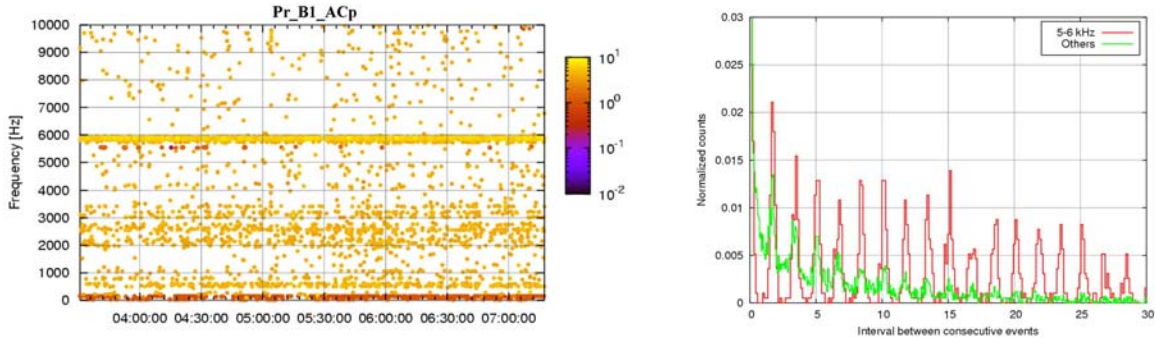


FIG. 6.8 – *A gauche : visualisation dans le plan temps-fréquence des événements détectés par VirgoHACR sur le signal de frange noire pendant la prise de données WSR8. On observe une population d'événements plus importante entre 5 et 6 kHz. A droite : La distribution temporelle de ces événements montre leur corrélation avec le mouvement à 0.6 Hz de la séparatrice de l'interféromètre dont la suspension est excitée par le bruit sismique.*

A ce jour, aucune comparaison systématique des résultats de glitchMoni, outlierMoni et VirgoHACR n'a été faite. Toutefois, même si quelques uns des signaux transitoires détectés par glitchMoni lors des dernières prises de données ne l'ont pas été par outlierMoni et VirgoHACR, glitchMoni peut être considéré comme un premier outil de détection dont les performances sont désormais dépassées par les nouveaux algorithmes mis en ligne.

6.3.4 Algorithmes de recherche de "bursts" d'ondes gravitationnelles

Par principe, aucune frontière ne sépare vraiment les algorithmes cherchant des signaux transitoires issus de l'interféromètre ou de son environnement et les algorithmes cherchant des signaux transitoires d'ondes gravitationnelles. D'autres algorithmes que glitchMoni, outlierMoni ou VirgoHACR ont été développés pour la détection de signaux transitoires, avec souvent comme perspective la détection d'ondes gravitationnelles plutôt que l'étude du bruit du détecteur. Il me semble intéressant de les mentionner ici car ils sont évidemment aussi capables de fournir des résultats intéressants pour construire puis appliquer des vetos sur les signaux transitoires instrumentaux. Je décris ci-dessous brièvement deux de ces algorithmes.

WDFMoni

Comme outlierMoni, cet algorithme blanchit le signal. Mais il utilise une transformée en ondelettes plutôt qu'une transformée de Fourier et cherche dans le plan "temps-fréquence" des coefficients d'ondelettes supérieurs à un seuil donné. WDFMoni, développé par E. Cuoco, a été testé sur des données simulées puis utilisé sur les données de plusieurs runs de commissioning, où il a détecté la plupart des signaux transitoires injectés dans l'interféromètre [66]. Ses résultats sont donc prometteurs pour la recherche de signaux transitoires d'ondes gravitationnelles mais aussi pour la construction de vetos sur les signaux transitoires instrumentaux.

Des problèmes d'interface avec la librairie "Fd" ont pour l'instant retardé sa mise en ligne.

MF

Plusieurs des algorithmes de recherche de "bursts" ont été développés au LAL [66]. Ils fonctionnent actuellement en différé et ont permis de détecter des événements transitoires instrumentaux, voire de trouver des canaux auxiliaires pouvant servir de veto [67]. L'un d'eux, Mean Filter (MF), a été très utilisé dans la recherche de signaux transitoires dans les données des runs de commissioning. Comme outlierMoni, cet algorithme blanchit les données. Puis, il calcule tout simplement une moyenne glissante sur une durée de quelques millisecondes. La durée du signal recherché n'étant pas connue, l'algorithme MF est utilisé en plusieurs exemplaires avec des durées différentes. La conséquence est un plus grand nombre de fausses alarmes, mais la performance sur un bruit de fond gaussien reste intéressante : un taux de faux déclenchements de 7×10^{-5} pour une probabilité de détection de 50% [68]. Cet algorithme a aussi été testé avec des signaux transitoires (SNR=25) injectés pendant les runs de commissioning et les a détectés, son taux de fausses alarmes pendant le run WSR8 (donc sur le bruit de Virgo) étant de l'ordre de 10^{-2} pour une efficacité de 90% sur les trois types de signaux transitoires injectés.

6.4 Mise en ligne des algorithmes de recherche de signaux transitoires

Comme la qualification des données, les résultats des algorithmes qui analysent le bruit du détecteur peuvent fournir des informations utiles en salle de contrôle, non pas pour réagir rapidement à un dysfonctionnement du détecteur, mais pour pouvoir estimer la qualité des données en "Science Mode" et leur pertinence pour la recherche de signaux d'ondes gravitationnelles. La figure 6.9 montre un exemple des pages web que j'ai réalisées pour visualiser les résultats des algorithmes de recherche en ligne des signaux transitoires ². Sur ces pages sont montrés entre autres les signaux de canaux auxiliaires (signaux de surveillance de l'environnement ou signaux de contrôles de l'interféromètre) pouvant contenir des bruits transitoires en coïncidence avec ceux détectés sur le signal de frange noire. Le choix de ces canaux auxiliaires doit encore être affiné grâce aux informations provenant du commissioning.

A terme, certains de ces canaux auxiliaires pourraient être proposés pour servir de veto dans la recherche d'ondes gravitationnelles. La pertinence de ces vetos (efficacité sur les signaux transitoires, taux de déclenchement, taux de déclenchement en coïncidence avec un signal d'onde gravitationnelle) devra ensuite être précisément mesurée avant de les rendre actifs dans les chaînes d'analyse. C'est un travail qui a commencé pour les algorithmes de recherche de bursts et ce sera une partie importante de mon travail avec glitchMoni et outlierMoni pour les mois à venir.

La visualisation en ligne des résultats utilise actuellement un choix de canaux auxiliaires. Une première amélioration serait de ne pas faire de choix à priori mais plutôt d'analyser en différé tous les canaux auxiliaires existant, et ce uniquement sur les segments de données où des bruits transitoires ont été détectés en ligne dans le signal de frange noire. Les résultats obtenus seraient ensuite visualisés sur le web avec une latence un peu supérieure à celle des informations directement fournies par glitchMoni ou outlierMoni. Une autre amélioration serait de montrer comment se distribuent dans le plan temps-fréquence les différents événements détectés par les

²<http://www.casina.virgo.infn.it/MonitoringWeb/Noise>

algorithmes. Enfin, il serait très utile de montrer en priorité les événements qui ont fait déclencher les différents algorithmes en coïncidence dans une même fenêtre de temps.

Last event and loudest events of last hour .. (2544 events detected)

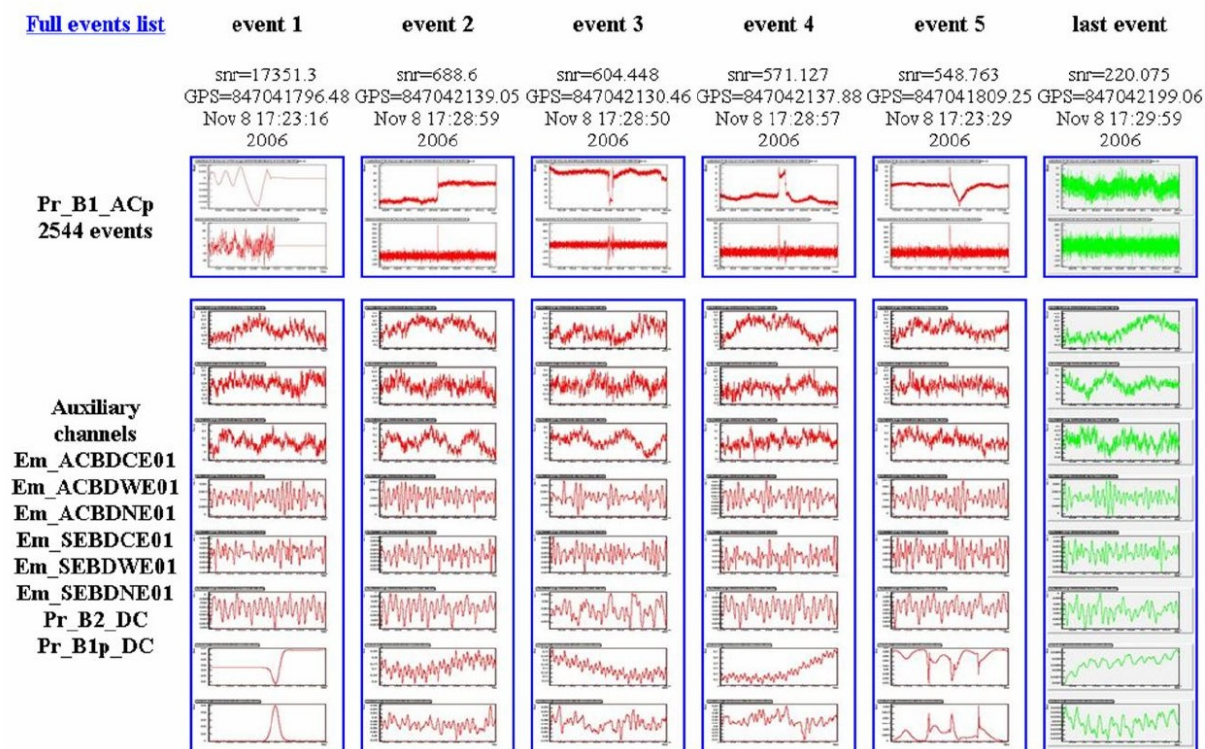


FIG. 6.9 – Exemple d'informations fournies en salle de contrôle via le web par un des algorithmes mis en ligne pour la recherche de bruits transitoires (outlierMoni). Les graphiques sont montrés sous forme d'icônes que l'on peut agrandir en cliquant dessus. La première ligne montre les 5 plus forts événements détectés par l'algorithme pendant la dernière heure, avec, pour chacun, le signal de frange noire Pr_B1_ACp lors de l'événement et sa version blanchie outlierMoni_Pr_B1_ACp_whitened. Au-dessous figure un ensemble de canaux auxiliaires (enregistrement du bruit acoustique ou sismique, puissance du faisceau revenant vers le laser, etc...) susceptibles de posséder un signal transitoire corrélé avec l'événement détecté sur le signal de frange noire.

L'architecture mise en place pour les algorithmes de recherche en ligne de signaux transitoires est semblable à celle réalisée pour les algorithmes de qualification des données. Un "main frame builder" (FbmNoise) collecte les données brutes et les "flags de qualité" puis les rend disponibles dans une mémoire partagée. Les algorithmes lisent les données dans cette mémoire partagée puis envoient leurs résultats vers un autre collecteur (FbmStNoise) qui les propage vers le collecteur principal du DAQ (FbmSt).

Au sein de cette architecture, j'ai mis en ligne également d'autres algorithmes étudiant le bruit du détecteur : une recherche de lignes spectrales (LineMonitor) et un suivi de l'évolution du rms dans différentes bandes de fréquence (NonStatMoni). Beaucoup de travail reste à faire pour

organiser les résultats de tous ces algorithmes et fournir un ensemble d'informations pertinentes en salle de contrôle et aux programmes d'analyse.

6.5 Suivi de la non-stationnarité du bruit

Même en l'absence de signaux transitoires, la recherche d'ondes gravitationnelles est limitée par un signal de frange noire non-stationnaire. Par exemple, durant les prises de données C6 et C7, outlierMoni et certains algorithmes de recherche de "bursts" ont mis en évidence des périodes de plusieurs secondes où le rms du signal de frange noire "blanchi" augmentait d'un facteur 2 ou 3. L'analyse de ces périodes a permis de montrer qu'elles étaient corrélées avec les fluctuations d'alignement de l'interféromètre. Depuis, les contrôles d'alignement ont été améliorés et ces phénomènes ont disparus.

Au-delà de la détection de signaux transitoires, il est donc intéressant d'étudier les fluctuations de la distribution et du spectre du signal sur des échelles de temps supérieures à la seconde. Le but est d'éliminer la source de ces non-stationnarités ou de traiter les données de façon à limiter leur impact sur l'analyse de données.

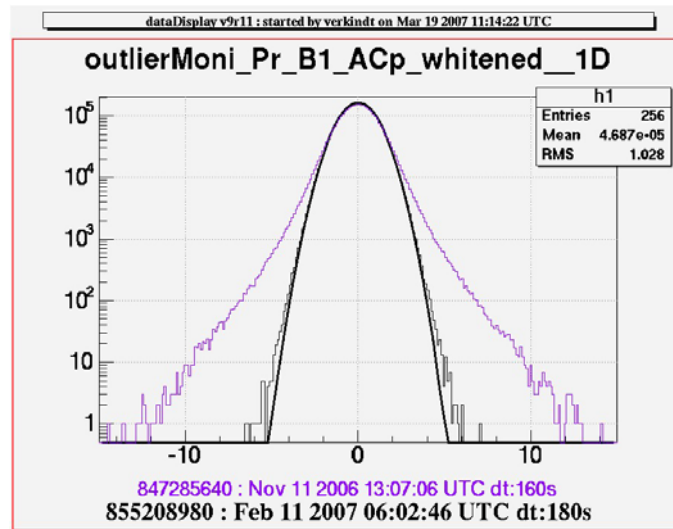


FIG. 6.10 – Le signal de frange noire "blanchi" par outlierMoni. La distribution de ce signal fournit une bonne estimation de la gaussiannité du bruit sur la frange noire. On note une nette amélioration entre le run WSR5 (novembre 2006) et le run WSR8 (février 2007)

Prise de données	WSR1	WSR2	WSR5	WSR6	WSR7	WSR8	WSR9
Durée (s)	201600	201600	201600	201600	201600	201600	201600
outlierMoni (th=6)	15724	97826	33240	16000	1536	3194	1996

TAB. 6.1 – Evolution du nombre de transitoires détectés par outlierMoni pendant les dernières prises de données, de septembre 2006 à mars 2007. On observe clairement une diminution du nombre d'événements à partir du run WSR7 où l'alignement global de l'interféromètre a été amélioré.

Lors des runs techniques du CITF puis des runs de commissioning de Virgo, les résultats de outlierMoni ont permis de constater que la distribution du bruit sur le signal de frange noire n'est pas gaussienne et que la queue de distribution, tout comme la coloration du spectre, peuvent varier sur de courtes durées (quelques minutes). Cette non-stationnarité du bruit est en grande partie liée aux fluctuations à basses fréquences de l'alignement de l'interféromètre. Les améliorations apportées ces derniers mois au système d'alignement automatique ont permis, comme le montre la figure 6.10, de réduire considérablement ces queues de distribution. Cette amélioration de la stationnarité du signal de frange noire est donc aussi visible sur le nombre d'événements détectés par l'algorithme outlierMoni dans les segments "Science Mode" des données. Le tableau 6.1 montre l'évolution de ce nombre d'événements au cours des dernières prises de données de Virgo.

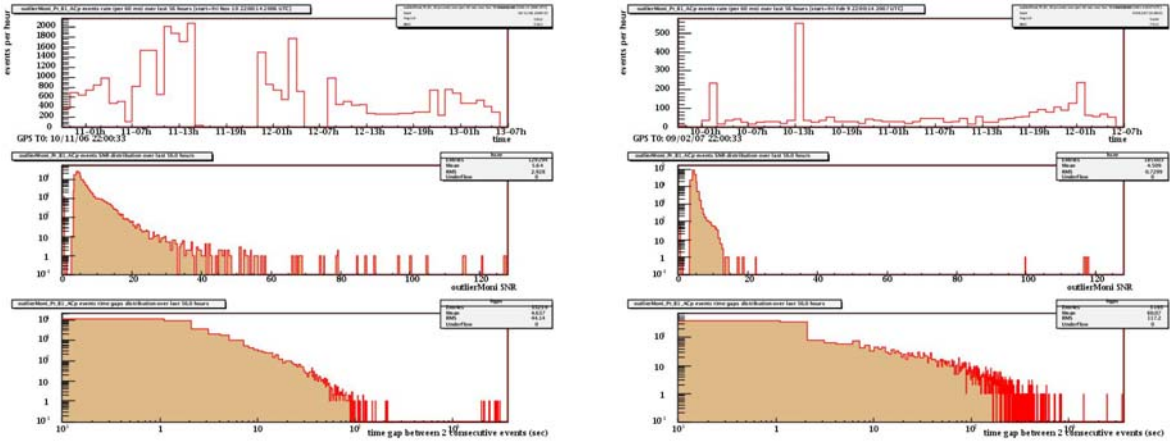


FIG. 6.11 – *A gauche : les résultats statistiques de outlierMoni pendant les segments "Science Mode" du run WSR5. A droite : ces mêmes résultats pendant les segments "Science Mode" du run WSR8. La courbe du haut montre l'évolution du nombre d'événements par heure. La courbe du milieu montre la distribution des résultats de outlierMoni (maximum sur 1 seconde du signal blanchi). La courbe du bas montre la distribution de la durée écoulée entre deux événements consécutifs. On observe sur la courbe du milieu que WSR8 contient moins d'événements à haut SNR (le détecteur est moins bruyant). La courbe du haut montre que ces événements ont une "clusterisation" moins prononcée (les deux premiers pics dans le graphique en haut à droite ne sont dûs qu'à un flag "Science Mode" remis trop tôt après le reverrouillage de l'interféromètre). La courbe du bas montre pour WSR8 des événements plus éloignés les uns des autres dans le temps, donc éventuellement aussi une moindre clusterisation..*

Les statistiques fournies en ligne par le web (figure 6.11) montrent d'autre part que, même lorsque l'interféromètre est dans la configuration stable "Science Mode", la distribution temporelle des événements et la distribution du rapport signal sur bruit varient beaucoup d'un run à l'autre. Il s'agit parfois de conditions climatiques défavorables (sismicité due au vent et à l'agitation de la mer Méditerranée) ou de séismes de forte magnitude en Alaska ou au Japon. Mais l'étude exhaustive des causes de ces variations, donc de la non-stationnarité du bruit du détecteur reste encore à faire. L'amélioration du système d'alignement et du contrôle du premier étage des suspensions devrait permettre déjà de diminuer ces variations en rendant l'interféromètre moins sensible aux conditions climatiques.

L'étude de la stationnarité du signal de frange noire est également réalisé par un algorithme de G. Vajente, mis en ligne il y a quelques mois (NonStatMoni). Cet algorithme calcule les rms du signal de frange noire sur différentes bandes de fréquence puis forme un nouveau signal (basse fréquence) à partir de ces valeurs et calcule sa fonction de cohérence avec des signaux de contrôle de l'interféromètre. Grâce à cet algorithme ont pu être mises en évidence la cohérence entre certains signaux d'alignement et des fluctuations du spectre du signal de frange noire dans certaines bandes de fréquence.

Les informations accumulées par l'étude de la stationnarité du signal de frange noire ont permis d'améliorer les performances du détecteur. Ont ainsi été réduites par exemple les fluctuations qui limitent les conditions de stabilité des asservissements donc empêchent la diminution des bruits de contrôle. La réduction de la non-stationnarité du signal de frange noire se poursuit et permettra également de faciliter les conditions de fonctionnement et de déclenchement des programmes d'analyse en leur fournissant un bruit de fond dont la distribution se rapproche d'une distribution gaussienne.

6.6 Perspectives sur la recherche de signaux transitoires et sur l'étude de la stationnarité du signal de frange noire

En ce qui concerne l'étude de la stationnarité du signal de frange noire, plusieurs résultats ont déjà été obtenus et ont permis de mieux cerner quelles étaient les sources possibles de non-stationnarité (fluctuation de l'alignement des miroirs, mouvements des suspensions des miroirs liés à l'activité sismique éolienne et maritime). C'est un travail toujours en cours et qui permettra, soit de réduire la non-stationnarité à la source, soit de mieux connaître ses caractéristiques afin de mieux la prendre en compte dans les algorithmes de recherche d'ondes gravitationnelles.

En ce qui concerne la recherche de signaux transitoires instrumentaux ou environnementaux, c'est une étude indissociable de la recherche de signaux d'ondes gravitationnelles. A terme, tous les algorithmes développés pour détecter ces bruits transitoires auront d'abord pour but la détection des ondes gravitationnelles et seront donc soumis à des contraintes fortes (efficacité en fonction du taux de fausses alarmes) puis utilisés selon deux modes :

- Sur le signal de frange noire pour détecter les ondes gravitationnelles (de préférence en coïncidence avec d'autres détecteurs comme LIGO).
- Sur des canaux auxiliaires (signaux de contrôles de l'interféromètre ou signaux des capteurs surveillant l'environnement) afin de construire des vetos et réduire le taux de fausses alarmes sur le signal de frange noire.

Ces deux modes de fonctionnement ont déjà commencé dans Virgo et représenteront une part importante de l'analyse des données du premier run commun entre Virgo, LIGO et GEO600 (mai à septembre 2007). Dans ces deux domaines, j'ai fourni des outils en ligne dont les résultats sont montrés en salle de contrôle mais restent encore peu exploités. Mes perspectives sont actuellement :

- d'améliorer l'organisation des résultats visualisés en ligne
- de caractériser plus précisément les algorithmes glitchMoni et outlierMoni et de mesurer leurs performances
- d'exploiter les résultats de glitchMoni et outlierMoni, et plus généralement de l'ensemble des algorithmes en ligne, pour construire des vetos et fournir une aide au commissioning du détecteur.

Conclusion et perspectives sur l'expérience Virgo

Mes contributions à la construction et au commissioning du détecteur Virgo ont tout d'abord été orientées vers l'acquisition de données, avec une forte implication dans les aspects logiciels mais aussi une présence soutenue sur le site du détecteur.

Tout en continuant à assurer le suivi et l'amélioration de l'acquisition de données, je me suis ensuite investi dans des travaux plus directement liés aux activités du commissioning en créant le dataDisplay et en réalisant l'architecture logicielle de la surveillance en ligne du détecteur et de la qualification des données.

Après une première analyse du bruit du détecteur (la recherche de signaux transitoires dans les données du CITF) j'ai été responsable de cette analyse pendant les runs de commissioning de Virgo. J'ai ensuite fourni les outils et l'architecture pour la mise en ligne des algorithmes développés dans la collaboration pour l'analyse en ligne du bruit du détecteur.

Toutes ces activités ont été essentiellement "softwares", fournissant des outils nécessaires pour le commissioning du détecteur et réclamant une maintenance régulière. Elles ont été également la source de nombreuses sollicitations de la part des personnes travaillant sur le commissioning, que ce soit pour faire évoluer le dataDisplay et l'acquisition de données ou pour mettre en place la qualification des données.

Ainsi que je l'ai détaillé au chapitre 6, je compte, dans les années à venir participer plus directement à la compréhension du détecteur et à l'analyse des données, c'est à dire m'impliquer plus avant dans l'analyse du bruit du détecteur et le développement d'algorithmes de recherche de signaux d'ondes gravitationnelles.

Enfin, à plus long terme, mes thèmes de recherche garderont autant que possible des liens étroits avec l'astrophysique.

Chapitre 7

Autres activités scientifiques

Mes activités, notamment au cours de ces 5 dernières années, ont été tournées vers la recherche expérimentale mais aussi vers la diffusion de la culture scientifique qui représente, à mon avis, un complément non-négligeable du travail de recherche. La diffusion de la culture scientifique est une part secondaire mais importante de mes activités. Je décris dans ce chapitre quelles en ont été les motivations et quelles en ont été les différentes facettes. Je conclus sur un bilan des actions de communication menées au laboratoire et sur leur avenir possible.

7.1 Introduction

Dans un domaine de recherche difficile d'accès au grand public comme la physique des particules, faire de la diffusion de la culture scientifique présente au premier abord une difficulté majeure : il faut voir les choses dans leur complexité et dans le détail pendant son travail de recherche et parvenir toutefois à les simplifier sans les caricaturer lorsqu'on en parle au public. A mon avis, cet exercice n'est réussi qu'en de rares occasions, mais j'ai toujours considéré que, malgré cette difficulté, la diffusion des connaissances scientifiques est un aspect important du travail d'un chercheur. D'abord parce que c'est un moteur puissant pour susciter des vocations dès le plus jeune âge, ensuite tout simplement parce qu'il est important d'améliorer les connaissances scientifiques d'un public qui croit encore à 50% que la Soleil tourne autour de la Terre.

Depuis le début de mon doctorat, en 1991, je me suis intéressé à la diffusion de la culture scientifique et j'ai essayé par divers moyens de partager mes connaissances et mes compétences dans le domaine de la physique. Cela m'a amené à écrire des articles ou des pages web, à participer à des Cafés Scientifiques, à faire des conférences ou des interventions dans les médias, à participer aux Portes Ouvertes du LAPP, etc...

Au vu de ces activités de diffusion de la culture scientifique, j'ai été nommé, à partir de janvier 2002, chargé de communication au LAPP. Cette tâche consistait avant tout à être le correspondant communication auprès de l'IN2P3, de l'Université de Savoie et de la Délégation Régionale du CNRS. J'ai rapidement voulu élargir cette fonction et j'ai mené avec quelques personnes du laboratoire, une série d'actions essentiellement orientées vers le grand public et les scolaires. Le but était de faire connaître le LAPP et de faire découvrir, notamment au jeune public, ce qu'est la science, quelle est sa démarche, quels sont les acquis scientifiques de notre époque et quelles sont les questions qui se posent encore aujourd'hui. J'ai d'autre part voulu aller

au-delà d'une simple exposition des connaissances et des compétences du LAPP et mettre l'accent sur les notions de démarche scientifique, d'incertitude de mesure, d'évolution des modèles théoriques créés par l'esprit humain pour décrire la nature. J'ai voulu également faire découvrir au public des notions élémentaires de physique et montrer quels sont les liens tissés entre recherche fondamentale et vie quotidienne.

Dans ce cadre là, j'ai travaillé avec la MJC d'Annecy-le-Vieux, les CCSTI de Cran-Gevrier et de Chambéry, le CDDP d'Annecy, l'association CNRS Sciences et Citoyens, et plusieurs établissements scolaires. J'ai eu à rencontrer des personnes qui consacrent beaucoup de temps et d'énergie à faire connaître les sciences au public. Une énergie qui contribue sans doute à motiver des élèves et des étudiants à se lancer dans les métiers de la recherche.

Je décris ci-dessous la plupart des activités que j'ai menées ou dans lesquelles j'ai été fortement impliqué, soit en direction du grand public, soit en direction des scolaires. Ceci en tant que simple chercheur intéressé par la diffusion de la culture scientifique puis en tant que chargé de communication au LAPP.

7.2 Diffusion de la culture scientifique auprès du grand public

Au cours de ces cinq dernières années, j'ai passé une partie de mon temps à nouer des contacts entre le LAPP et certaines structures associatives comme les CCSTI ou les MJC qui oeuvraient dans le domaine de la diffusion de la culture scientifique. Une convention entre le LAPP et la commune de Cran-Gevrier avait même été élaborée pour encadrer des actions communes du LAPP et du CCSTI (Centre Culturel Scientifique, Technique et Industriel). Pour un physicien passant une bonne partie de son temps sur l'expérience Virgo, assurer un suivi correct de ces contacts s'est révélé une tâche difficile voire impossible. Mais ce travail a toutefois abouti à des résultats en matière de communication auprès des scolaires (voir paragraphe 7.3) et en matière de communication auprès du grand public.

Auprès du grand public, mes actions ont suivi deux chemins : soit sortir du laboratoire et participer à des actions menées auprès du grand public (voire organiser certaines d'entre-elles), soit faire venir le public au LAPP pour des conférences ou des visites souvent organisées dans le cadre de Portes Ouvertes. Dans le premier cas, mes actions ont été essentiellement les suivantes :

- Membre du comité d'organisation, de janvier 2000 à juin 2005, des Cafés Scientifiques et Cafés Citoyens organisés par la MJC d'Annecy-le-Vieux.
- Participation au Café Scientifique organisé par la MJC d'Annecy-le-Vieux le 18 avril 2002 sur le thème : "la science refuse-t-elle ce qu'elle ne peut expliquer ?".
- Participation au Café Citoyen organisé par la MJC d'Annecy-le-Vieux le 14 octobre 2003 sur le thème : "les couleurs influencent-elles notre comportement ?".
- Participation au Café Scientifique organisé par la MJC d'Annecy-le-Vieux le 8 décembre 2004 sur le thème "Science et Société : regards croisés".
- Création d'une conférence donnée les 15 et 17 avril 2003, à Chambéry et à Annecy , pour les "Amphi pour tous" organisés par l'Université de Savoie : "DéTECTEURS d'ondes gravitationnelles : télescopes du futur".
- Participation à un Café scientifique organisé par l'association Sciences-Actions à Chambéry

le 12 octobre 2005 sur le thème de "la recherche dans les objets du quotidien" : voir http://www.scienceactions.asso.fr/archives.php?cafe_id=56

J'ai réalisé ce type de diffusion de la culture scientifique également par des interventions auprès des médias :

- Vulgarisation scientifique au sein du journal interne le "Courrier du LAPP" de 1992 à 1997.
- Interviews à Radio-Nessy (1998) et Radio-Semnoz (1999) en collaboration avec l'IUT d'Annecy-le-Vieux.
- Interview de 45 mn sur Radio-France bleue Pays de Savoie, en avril 2003, à l'occasion des conférences "Amphi pour tous".
- Interview de 20mn sur Radio-RCF, à propos du LAPP et de la recherche en physique des particules.
- Rédaction d'un article sur "la recherche fondamentale dans les objets du quotidien" dans le JITEC, journal d'information technologique édité par Thésame, centre de ressources en mécanique, gestion industrielle et management de l'innovation : voir <http://lapp.in2p3.fr/communication/JITEC>
- Rédaction d'un article sur "la recherche fondamentale dans les objets du quotidien" dans le numero de novembre 2005 de "Questions de physique" édité par le comité Rhône-Alpes pour l'Année Mondiale de la Physique : voir <http://amp2005.in2p3.fr/rhone-alpes/qdp.htm>
- Initiateur et participant avec le CCSTI de Cran-Gevrier à la conception d'une émission mensuelle de télévision sur TV8 Mont-Blanc, consacrée à "la recherche dans les objets du quotidien".

Dans le deuxième cas, mes actions de communication sont pratiquement toutes liées à des Portes Ouvertes du LAPP organisées à l'occasion de manifestations nationales comme la Fête de la Science ou l'Année Mondiale de la Physique :

- Participation régulière aux "Portes Ouvertes" et à la "Science en Fête" au LAPP de 1993 à 2006.
- Participation aux 20 ans du LAPP, en 1996, avec notamment l'élaboration de 6 panneaux présentant l'expérience Nomad et la particule neutrino et la création de pages web sur l'histoire des neutrinos.
- Participation active aux journées "Portes Ouvertes" organisées par le LAPP pour la "Fête de la Science" en 2002.
- Participation aux journées "Portes Ouvertes" organisées par le LAPP pour la "Fête de la Science" 2004. Initiateur du "Voyage au pays des particules" et participant à la mise en place du parcours et des ateliers qui accueilleraient les visiteurs, ainsi qu'à la réalisation des cartes particules conçues à cette occasion. J'ai également conçu un des ateliers de ce parcours consacré à la démarche scientifique.
Voir <http://lapp.in2p3.fr/SF2004>. Ce "voyage aux pays des particules" a été fortement soutenu par le CNRS et l'IN2P3 ainsi que l'Université et le Conseil Général de Haute-Savoie. Il a accueilli plus de 1100 visiteurs en deux jours. Cette "Fête de la Science" 2004 reste une date marquante qui a fait beaucoup évoluer l'exposition permanente du LAPP.
- Coordinateur au LAPP pour les activités de "Fête de la Science 2005" et de "l'Année

Mondiale de la Physique” : <http://lapp.in2p3.fr/AMP> Organisateur à cette occasion de plusieurs conférences grand public données au LAPP.

- Conférence grand public ”la recherche fondamentale dans les objets du quotidien” faite au LAPP le 8 octobre 2005 dans le cadre de l’Année Mondiale de la Physique.
- Création de fiches grand public distribuées à l’occasion des 30 ans du LAPP et de la Fête de la Science 2006.

J’ai également initié et participé à la mise en place d’une exposition permanente au LAPP, ”de l’infiniment petit aux étoiles”, consacrée à divers aspects de la physique de particules et de l’astrophysique. Celle-ci présente des panneaux explicatifs, des détecteurs en exposition, des bornes interactives, des expériences interactives (mesure de la vitesse de la lumière, interféromètre, courbure de l’espace, radioactivité naturelle, expérience de Rutherford, tube de Crookes...) ou seulement démonstratives (chambre à brouillard, chambre à étincelles, mesure du temps de vie de muons cosmiques,...). Créée en octobre 2002 à l’occasion de la Fête de la Science, elle s’est ensuite enrichie au cours des ans et a été à la base de plusieurs visites annuelles du public, hors Portes Ouvertes. Comme nous le verrons au paragraphe 7.3, cette exposition est également un outil important des visites de scolaires au laboratoire.

Exposition permanente



FIG. 7.1 – *Exposition permanente du LAPP en février 2007*

7.3 Diffusion de la culture scientifique auprès des scolaires

Depuis 5 ans, dans ce domaine également, les liens établis avec les établissements scolaires, les collectivités locales (mairie d'Annecy-le-Vieux, mairie de Cran-Gevrier), les structures associatives (CCSTI de Cran-Gevrier ou de Chambéry, MJC d'Annecy-le-vieux) ou le Rectorat et le CDDP d'Annecy ont été le fruit d'un long travail dont les résultats, peu à peu, se sont consolidés. Le LAPP a ainsi participé à des manifestations comme ExpoSciences 2005 ou les Olympiades de Physique, a assuré des conférences dans les lycées, et a organisé des visites du laboratoire pour une quarantaine de classes (plus de 1100 élèves) depuis 2002. De plus, les liens ainsi établis, s'ils se pérennisent, peuvent aboutir à des collaborations plus étroites avec les professeurs ou les instituteurs et permettre ainsi de consolider des liens trop souvent occasionnels avec les établissements scolaires.

L'accueil des scolaires au laboratoire repose sur l'exposition permanente du LAPP. Celle-ci est devenue modulable et présente des panneaux, détecteurs, bornes multimédias ou expériences interactives différents selon le thème de la visite organisée pour les scolaires (ou le grand public).

Au cours des visites organisées au LAPP ou des conférences dans les établissements scolaires, nous avons peu à peu constaté que les interventions des chercheurs étaient trop souvent perçues par les enseignants et les élèves comme utilisant des mots trop compliqués et expliquant trop de choses à la fois. Ce genre de constatations a entraîné, parmi les personnes du LAPP impliquées dans ces actions, une réflexion importante sur la façon d'accueillir les scolaires, de leur montrer ou de leur expliquer des notions de physique, sans trop déformer celles-ci mais sans trop en dire non plus. Les visites se sont donc orientées vers des visites à thème, accompagnées d'un questionnaire que doivent remplir les élèves de façon à rendre la visite plus interactive. Selon ce schéma, plus de 150 élèves d'un lycée ont été accueillis le 29 mars 2007 pour une visite sur les thèmes du LHC et d'ATLAS. enseignants et élèves ont exprimé leur satisfaction et nous ont dit, pour la première fois, que ce qui leur était expliqué ou montré était adapté à leur niveau!... Ce qui montre les progrès accomplis.

Nous avons d'autre part acquis la conviction que nous devons aussi fortement orienter les actions d'éveil aux sciences vers les classes primaires. Cette réflexion nous a conduit en 2006 à imaginer un parcours de visite dédié aux enfants de 7 à 12 ans, "Moi, la Fleur et le Caillou", qui a accueilli plus de 250 élèves du primaire sur 3 jours, lors des 30 ans du LAPP. Son initiatrice, Isabelle De Bonis, a ensuite démarré un projet avec une classe de CE2-CM1, sur l'année scolaire 2006-2007, "la spirale des dimensions", avec cette même idée d'explications scientifiques plus adaptées aux enfants. Là encore, des progrès de communication ont été réalisés puisque enseignants, parents et enfants ont exprimé leur enthousiasme, oralement ou par écrit. S'il s'en donne les moyens, le LAPP peut à l'avenir s'ancrer plus fortement dans cette démarche puisque d'autres enseignants du primaire et de collèges sont maintenant demandeurs de ce type de projet pour la prochaine année scolaire.

J'accompagne ce propos d'une liste non-exhaustive des actions que j'ai réalisé pour la diffusion de la culture scientifique auprès des scolaires :

- Conférences données au Lycée La Versoie, Thonon-les-Bains en 1997 : "Le neutrino et son histoire".

- Conférences données au Lycée La Versoie, Thonon-les-Bains en 1998 : "Le centenaire de la radioactivité".
- Création de plusieurs conférences ("la démarche scientifique", "qu'est-ce que la science?") données dans des lycées en 2003, 2004 et 2005 : voir <http://lapp.in2p3.fr/communication/conferences/conf.html>
- Participation à un Café Scientifique Junior à Aix-les-Bains le 17 novembre 2004 sur le thème : "Autour de la cosmologie".
- Participation à un Café Scientifique Junior à Aix-les-Bains le 15 décembre 2006 sur le thème : "Exoplanètes, matière noire et ondes gravitationnelles".
- Participation à une dizaine de visites du laboratoire par des associations, des personnes de l'Université, des classes de collèges ou de lycées. Ces visites s'appuient en grande partie sur une exposition permanente mise en place au LAPP à l'occasion des "Portes Ouvertes" organisées pour la "Fête de la Science" en 2002.
- Participation à l'accueil au LAPP de 90 élèves de classes primaires lors du transit de Vénus devant le Soleil, en Juin 2004.
- Participation à l'accueil de 350 élèves lors des Portes Ouvertes de la "Fête de la Science" 2004 et de 150 élèves d'écoles primaires lors des journées "Portes Ouvertes" organisées par le LAPP pour la "Fête de la Science" 2006.
- Membre du jury et du comité organisateur de ExpoSciences 2005 en Haute-Savoie.
- Lors des Portes Ouvertes organisées pour la "Fête de la Science" 2006 et les 30 ans du LAPP, participation à la conception et à la mise en place d'un parcours dédié aux enfants "Moi, la fleur et le caillou". Voir <http://lapp.in2p3.fr/30ANS>



FIG. 7.2 – Accueil de 90 élèves de primaires au LAPP à l'occasion du passage de Vénus devant le Soleil en juin 2004

7.4 Conception de pages web

Aujourd'hui, beaucoup d'informations passent par Internet. Il est donc essentiel que la communication auprès du grand public passe aussi par ce moyen, qui n'a pas les qualités ou les facilités d'un livre que l'on tient en main ni les avantages d'un contact direct avec le public, mais qui diffuse sur une large audience les informations que l'on souhaite partager. Depuis une dizaine d'années environ, j'ai donc créé des pages web ou initié la création de sites web décrivant des thèmes de recherche du laboratoire, expliquant la démarche scientifique ou décrivant certains aspects historiques de la recherche en physique des particules.

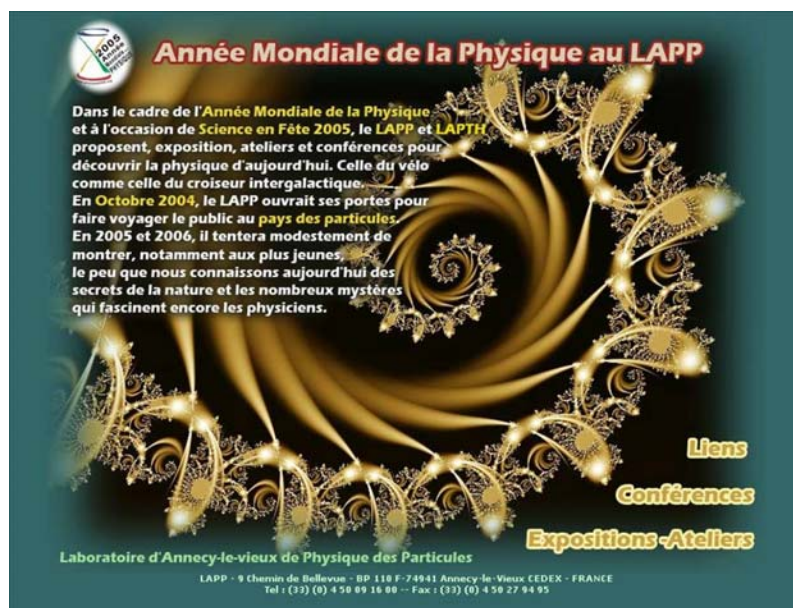


FIG. 7.3 – Page web du LAPP pour l'Année Mondiale de la Physique 2005

- Participation aux 20 ans du LAPP, avec l'écriture de pages Web sur l'histoire du neutrino et sur la découverte de la radioactivité :
<http://wwwlapp.in2p3.fr/neutrinos>
<http://wwwlapp.in2p3.fr/neutrinos/centenaire/rad.html>
- Premières tentatives de pages Web de vulgarisation de la physique :
<http://wwwlapp.in2p3.fr/vulgarisation>
- Réalisation de pages Web sur le détecteur TRD de NOMAD :
<http://wwwlapp.in2p3.fr/nomad/descriptf.html>
- Réalisation des pages Virgo au LAPP :
<http://wwwlapp.in2p3.fr/virgo/virgo.html>
- Maintenance de la page web sur l'histoire des neutrinos :
<http://wwwlapp.in2p3.fr/neutrinos>.
- Maintenance des pages web pour la communication au LAPP :
voir <http://lapp.in2p3.fr/communication>
- Mise en place des pages web pour les activités de "l'Année Mondiale de la Physique" au LAPP (Merci à Gérard Dromby, infographiste au LAPP) :
<http://lapp.in2p3.fr/AMP>

- Développement depuis juin 2006 du site web grand public du LAPP, avec l'aide d'une petite équipe et de l'inforgraphiste du LAPP. Ce site présente l'exposition permanente, l'histoire, les expériences et les thèmes de recherche du laboratoire, l'intérêt de la recherche fondamentale, la démarche scientifique, etc...

7.5 Responsabilités dans le domaine de la communication scientifique

Depuis plusieurs années et notamment depuis que j'assume la responsabilité de chargé de communication au LAPP, j'ai eu l'occasion de participer à certains comités d'organisation ou d'assurer des responsabilités pour le LAPP et pour les manifestations "Fête de la Science" :

- Responsable du "Courrier du LAPP" durant l'année 1996.
- Webmaster au LAPP de janvier 2002 à janvier 2005.
- Chargé de communication au LAPP de janvier 2002 à janvier 2007 : voir <http://lapp.in2p3.fr/communication>
- Expertise en 2001, 2002, 2003 et 2004 pour les projets Science en Fête proposés dans les départements de la Drôme, de l'Isère ou de la Savoie.
- Membre du comité d'organisation, de janvier 2000 à juin 2005, des Cafés Scientifiques et Cafés Citoyens organisés par la MJC d'Annecy-le-Vieux.
- Membre du jury et du comité organisateur de ExpoSciences 2005 en Haute-Savoie.
- Coordinateur au LAPP pour les activités de "Fête de la Science 2005" et de "l'Année Mondiale de la Physique" : <http://lapp.in2p3.fr/AMP>
- Membre du comité d'organisation des conférences CNRS-Sciences et Citoyens, depuis janvier 2006.

7.6 Conclusions

Depuis plusieurs années, une impulsion forte a été donnée à la communication scientifique, que ce soit à l'IN2P3, au CNRS ou à l'Université de Savoie. Le LAPP s'est également investi depuis plus de 15 ans dans la communication vers le grand public, mais trop souvent de manière ponctuelle, à l'occasion de manifestations comme la Fête de la Science ou lors d'un anniversaire du laboratoire. J'ai participé à la plupart de ces actions.

Puis, entre 2002 et 2007, en tant que chargé de communication, j'ai essayé de pérenniser certaines actions de communication et de rendre plus réguliers les contacts avec le public et les scolaires. J'ai été en cela fortement aidé, et parfois remplacé, par une petite équipe de personnes prêtes à donner du temps à la diffusion des connaissances scientifiques. Ainsi se sont mis en place de nouveaux outils comme l'exposition permanente, de nouvelles démarches comme les visites de scolaires au laboratoire ou de nouveaux liens établis avec l'université de Savoie, les associations ou les collectivités locales. De plus, les actions auprès des scolaires se sont fortement organisées et se concrétisent désormais par des projets établis avec des classes tout au long de l'année.

En juin 2005, un rapport sur la communication a été remis à la direction du laboratoire. Il faisait le bilan des actions passées et en tirait notamment une conclusion et une proposition :

la nécessité d'un responsable communication à plein temps et la création d'une cellule communication au LAPP. Sur cette dernière proposition comme sur les projets avec les scolaires ou le développement de l'exposition permanente, la direction actuelle du laboratoire a émis un avis très favorable. Et, si les moyens humains sont suffisants, les prochaines années pourraient être non seulement celles des découvertes au LHC (et dans Virgo?) mais aussi celles d'une communication efficace et pérenne au LAPP.

Chapitre 8

Conférences, séminaires et encadrement de stages

8.1 Participation à des conférences

Je ne citerai ici que les conférences auxquelles j'ai participées depuis mon retour sur l'expérience Virgo en 1997.

- Présentation des outils développés pour le traitement en ligne et l'analyse de données de Virgo, aux XXXIVth Rencontres de Moriond, 23-30 janvier 1999 [53]
- Présentation de l'acquisition de données de Virgo au IXth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, Rome, 2-8 juillet 2000
- Participation à la conférence GWDAW5, Baton-Rouge, Louisiane, 14-16 décembre 2000
- Présentation de la recherche préliminaire de glitches dans le run E4 de Virgo, au VIIth Gravitational Wave Data Analysis Workshop (GWDAW7), Kyoto, Japon, 17-19 décembre 2002 [63]
- Participation à la conférence GWDAW9, Annecy, 15-18 décembre 2004 (membre du comité d'organisation)
- Présentation de l'acquisition de données de Virgo au XVth IEE-NPSS Real Time Conference, Chicago, Mai 2007 (proceedings à paraître)

8.2 Présentations et séminaires

J'ai fait par ailleurs, au LAPP et dans d'autres laboratoires, plusieurs présentations dans le domaine de l'astrophysique des particules, et plus particulièrement sur l'expérience Virgo.

- Présentation de l'activité du groupe Virgo du LAPP lors des journées du laboratoire en novembre 1999.
- Présentation d'une revue des expériences de détection des rayons cosmiques lors des journées de prospectives du laboratoire en mai 2001
- Présentation du bilan et des perspectives dans le domaine de la communication lors des journées du laboratoire, en novembre 2002 et en novembre 2005.
- Plusieurs présentations au LAPP concernant les activités de communication

- Présentation au LAPP du bilan des Portes Ouvertes réalisées au LAPP pour Science en Fête 2002 et 2004.
- Présentation d'un séminaire au LAPP sur la zététique, dans le cadre des "réunions du jeudi".
- Séminaire donné au LAPP en octobre 2002 faisant le bilan des conférences de l'été en astroparticules.
- Séminaire sur l'expérience Virgo présenté, en mai 2001, au DAPNIA, CEA-Saclay.
- Séminaire sur les détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles présenté, le 28 mars 2007, au département "Structure de la Matière" de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon.

8.3 Encadrement de stages

J'ai encadré le travail de stage dans l'expérience NOMAD (mars à juin 1995) de Jérôme Damet, étudiant du DEA de Physique Nucléaire de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg. Ce stage portait sur la sélection des traces d'électrons dans le détecteur NOMAD. Jérôme Damet a ensuite obtenu une bourse de thèse en 1997 à l'université d'Uppsala (Suède) puis est revenu au LAPP dans l'expérience OPERA, de janvier 2004 à juin 2006, sur un CDD CNRS. Il travaille depuis octobre 2006 à l'Institut de Radio-protection Appliquée de Lausanne.

J'ai encadré le travail de stage dans l'expérience VIRGO (juin à août 1999) de Thierry Gourdin, étudiant en Licence à l'Université Denis Diderot (Paris VII). Ce stage portait sur l'étude du bruit acoustique dans le signal de frange noire de Virgo.

J'ai encadré le travail de stage dans l'expérience VIRGO (juillet à septembre 2000) de Paolo Adragna, étudiant en Licence à l'Université de Pise, Italie. Ce stage portait sur la création d'algorithmes d'identification de lignes spectrales et d'algorithmes de mesure de non-stationnarité dans le signal de frange noire de Virgo.

J'ai encadré le travail de stage dans l'expérience VIRGO (décembre 2000) de Stéphane Paprocki, étudiant de Licence à l'Université de Marseille (Luminy). Ce stage portait sur la génération de templates de signaux de coalescence binaire et sur l'étude de la mémoire et de la puissance CPU nécessaires pour générer et stocker ces templates.

J'ai encadré le travail de stage dans l'expérience VIRGO (mars à juin 2001) de Loic Girard, étudiant du DEA d'Astrophysique de l'Université J. Fourier (Grenoble). Ce stage portait sur l'étude des besoins en puissance de calcul et en mémoire nécessaires pour la recherche de signaux de coalescence binaire, en fonction de divers paramètres.

J'ai encadré le travail de Anna Kaczmarzka, de l'Institut de Physique Nucléaire de Cracovie en Pologne, pendant une année post-doctorale au LAPP de novembre 2000 à novembre 2001. Ce travail portait en partie sur des algorithmes de qualification des données et sur l'analyse du bruit du détecteur.

A partir de 2002, j'ai oeuvré en parallèle à l'expérience Virgo et à la communication du LAPP. J'ai donc fait le choix de ne pas encadrer de stages durant cette période.

Bibliographie

- [1] *Etude d'algorithmes rapides de recherche d'un signal d'onde gravitationnelle provenant de coalescences d'étoiles binaires*, Thèse de doctorat en physique de particules, Université de Savoie, 93-CHAM-S003 (1993)
- [2] *Fast trigger algorithms for binary coalescences*, Astroparticle Physics 2 (1994) 235-248
- [3] *A simulation program for the Virgo experiment*, 6th Pisa Meeting on Advanced Detectors, La Biodola, Isola d'Elba, Italy 1994, Nucl. Inst. and Methods Phys. Res A360 (1995) 375-378
SIESTA : a time domain general purpose simulation program for the VIRGO experiment, Astroparticle Physics 10 (1999) 369-386
- [4] *A search for ν_{μ} - ν_{τ} oscillations using NOMAD detector*, Phys. Letters B431 (1998) 219-236
- [5] *Search for ν_{μ} - ν_{τ} oscillations in the NOMAD experiment*, Physics Letters B 570 19 (2003)
- [6] *A large area transition radiation detector for the NOMAD experiment*, Nucl. Inst. and Methods Phys. Res. A403 (1998) 363-382
- [7] *Performance of the NOMAD Transition Radiation Detector*, Nucl. Inst. and Methods Phys. Res. A411 (1998) 63-74
- [8] *Laboratory tests for the TRD*, D. Verkindt, Nomad Memo 97-012
- [9] *Space charge and TRD rejection*, D. Verkindt, Nomad Memo 97-019
- [10] *Some extended tools for track breakpoints analysis*, B. Cousins, Nomad Memo 96-016
- [11] *Detection of the free neutrino : a confirmation*, C.L. Cowan, F. Reines, F.B. Harrison, H.W. Kruse, A.D. McGuire, Science 124 (1956) 103-104
- [12] *Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos*, G. Danby, J-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz, and J. Steinberger Phys. Rev. Lett. 9, 36-44 (1962)
- [13] *The search for the neutrino mass by direct method in the tritium beta-decay and perspectives of study it in the project KATRIN*, V.M.Lobashev (Troitsk Experiment), Nuclear Physics A 719 (2003) 153-160.
High precision measurement of the tritium β spectrum near its endpoint and upper limit on the neutrino mass, Ch. Weinheimer, B. Degen, A. Bleile, J. Bonn, L. Bornschein, O. Kazachenko, A. Kovalik, E.W. Otten, (Mainz Experiment) Phys. Lett. B460 (1999) 219
- [14] *Search for neutrino oscillations at 15, 40 and 95 meters from a nuclear power reactor at Bugey*, B. Achkar, R. Aleksan, M. Avenier, G. Bagieu, J. Bouchez, et al., Nuclear Physics B 434 (1995) 503-532

- [15] *Limits on neutrino oscillations from the CHOOZ experiment*, M. Apollonio, A. Baldini, C. Bemporad, E. Caffau, F. Cei, Y. Déclais, H. de Kerret, et al., Phys. Lett. B 466 (1999) 415-430
- [16] *A search for neutrinos from the Sun*, Davis R. Jr, D.S. Harmer, K.C. Hoffman, Phys. Rev. Lett. 20 (1968) 1205-1209
- [17] J. Bahcall, Phys. Rev. C 56 (1997) 3391
- [18] *Gallium Solar Neutrino Experiments : Absorption Cross Sections, Neutrino Spectra, and Predicted Event Rates*, Phys. Rev. C 56 (1997) 3391
Hampel et al. (Gallex experiment), Phys. Lett. B 388 (1996) 384
Abdurashitov et al. (SAGE experiment), Phys. Rev. Lett. 77 (1997) 4708
- [19] *Final NOMAD results*, Astier et al., Nucl. Physics B, 611 (2001) 3-39
- [20] *Search for muon neutrino to tau neutrino oscillation using the tau decay modes into a single charged particle*, E. Eskut et al., Phys. Lett. B434 (1998) 205
- [21] C. Athanassopoulos et al., Phys. Rev. C 77 (1996) 3082
- [22] *Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory*, The SNO Collaboration , Phys. Rev. Lett. 89 (2002)
Measurement of Charged Current Interactions Produced by 8B Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory, The SNO Collaboration , Phys. Rev. Lett. 87 (2001)
- [23] *Measurement of Neutrino Oscillation with KamLAND*, K. Eguchi et al. (KamLAND collaboration), Phys. Rev. Lett. 90 (2003)
- [24] *Search for Electron Neutrino Appearance at the eV2 scale*, MiniBooNE collaboration, Phys. Rev. Lett. 98, 231801 (2007)
- [25] D.N. Spergel et al. (WMAP Collaboration), astro-ph/0603449
- [26] H. Poincaré, C.R. Académie des Sciences, Paris, 140 (1905) 1504.
- [27] A. Einstein, Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungberitche, p.154-167 (1918)
- [28] F. Pirani, Phys. Rev. 105 (1957) 1089-1099
R.A Isaacson, Phys. Rev. 166 (1968) 1263-1280
Voir aussi : K.S. Thorne, in 300 Years of Gravitation, (Eds.) S. W. Hawking and W. Israel, 1987,(Chicago Univ. Press).
- [29] R.A. Hulse, J.H. Taylor, Atrphysical Journal 195 (1974) 51-53
- [30] J.H. Taylor, J.M. Weisberg, Astrophysical Journal 345 (1989) 434
Damour T., Taylor J.H., Phys. Rev. D 45 (1992) 1840
- [31] *An increased estimate of the Merger Rate of Double Neutron Stars from observation of a highly relativistic system*, M. Burgay et al., Nature 426 (2003) 531-533
Gravitational Waves from Extragalactic Inspirling Binaries : Selection Effects and Expected Detection Rates, Nutzman et al., Astrophysical Journal 612 (2004) 364
- [32] *Reality of the Cylindrical Gravitational Waves of Einstein and Rosen*, J.Weber and J.Wheeler, Review of Modern Physics 29 (1957) 509
Evidence for Discovery of Gravitational Radiation, J.Weber, Phys. Rev. Lett. 22 (1969) 1302
- [33] *Detection and generation of gravitational waves*, J. Weber, Phys. Rev. 177 (1960) 306

- [34] Gertsenshtein M.E., Pustovoit V.I., Soviet Physics - JETP, **16**, 433 (1962)
- [35] R. Weiss, Quaterly Progress Report of the Reserch Laboratory of Electronics of the MIT, 105 (1972) 54
- [36] R.L. Forward et G.E. Moss, Bull. of the American Physical Society, 17 (1972) 1183
R.L. Forward, Phys. Rev. D 17 (1977) 379
- [37] T. Zwerger & E. Müller, Astron. Astrophys. 320 (1997) 209
H. Dimmelmeyer, J.A. Font, E. Mueller, Astron. Astrophys. 393 (2002) 523
- [38] *Study of coincidences between resonant gw detectors*, P.Astone et al., Class. And Quantum Gravity 18 (2001) 243
Upper Limits on Gravitational-Wave Emission in Association with the 27 Dec 2004 Giant Flare of SGR1806-20, L.Baggio et al., Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 081103
- [39] *Search for Gravitational Wave Bursts in LIGO's Third Science Run*, B. Abbott et al. (LSC), Class. Quantum Grav. 23 (2006) 29-39
- [40] *Joint LIGO and TAMA300 Search for Gravitational Waves from Inspiralling Neutron Star Binaries*, B. Abbott et al. (LSC), Phys. Rev. D 73 (2006)
Upper limits from the LIGO and TAMA detectors on the rate of gravitational-wave bursts, B. Abbott et al. (LSC), Phys. Rev. D 72 (2005)
Observation results by the TAMA300 detector on gravitational wave bursts from stellar-core collapses, Masaki Ando et al. (TAMA Collaboration), Phys. Rev. D 71 (2005)
Results of the search for inspiraling compact star binaries from TAMA300's observation in 2000-2004, T. Akutsu, et al. (TAMA Collaboration), Phys. Rev. D 74 (2006)
- [41] *Detector Description and Performance for the First Coincidence Observations between LIGO and GEO* B. Abbott et al. (LSC), Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 517 (2004) 154-179
- [42] *Detection in coincidence of gravitational wave bursts with a network of interferometric detectors : geometric acceptance and timing*, N. Arnaud et al, Phys. Rev. D 65, 042004 (2002)
Reconstruction of source location in a network of gravitational wave interferometric detectors, F. Cavalier et al., Phys. Rev. D 74, 082004 (2006)
- [43] *Analyse de la sensibilité du détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo*, R. Gouaty, Thèse à l'Université de Savoie LAP-T-2006-02 (mai 2006)
- [44] *The commissioning of central interferometer of the Virgo gravitational wave detector*, Astroparticle Physics 21 (2004) 1-22
- [45] *Virgo status and commissioning results*, Class. Quantum Grav. 22 Issue 10 (2005) 185-191
- [46] *Calibration of the Virgo Central Interferometer*, O. Veziant, Class. Quantum Grav. 20 (2003) 711
- [47] *Frame format specifications*, Internal notes LIGO-T970130-F-E and VIR-SPE-LAP-5400-102. Voir aussi <http://lapp.in2p3.fr/virgo/FrameL>
- [48] *Frame library documentation*, Virgo note VIR-MAN-LAP-5400-103. Voir aussi <http://lapp.in2p3.fr/virgo/FrameL>
- [49] *Frame Distribution documentation* :, Virgo note VIR-MAN-LAP-5400-105. Voir aussi <http://wwwcascina.virgo.infn.it/sDoc/virgoApp/Fd>
- [50] *Cm, Multi-purpose Communication package*, Virgo note VIR-MAN-LAL-5600-107. Voir aussi <http://wwwcascina.virgo.infn.it/sDoc/virgoApp/Cm>

- [51] *Frames Shared Memory*, Virgo note VIR-MAN-LAP-5400-113. Voir aussi <http://wwwcascina.virgo.infn.it/sDoc/virgoApp/Fd>
- [52] *Main Frame Builder documentation*, Virgo note VIR-MAN-LAP-5400-112. Voir aussi <http://wwwcascina.virgo.infn.it/sDoc/virgoApp/Fbm>
- [53] *The VIRGO Online Data Selection, a proposed off-line data analysis environment and an algorithms interface for GW Data Analysis*, Proceedings of XXXIVth Rencontres de Moriond (23-30 janvier 1999)
- [54] *Data Acquisition and Online Processing for the VIRGO experiment*, Proceedings of IXth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, Roma (2-8 juillet 2000)
- [55] *Data Acquisition : Schemes, Signals and Frame*, Note Virgo VIR-MAN-LAP-5400-110
- [56] *The Virgo data acquisition system*, Proceedings of XIIIth IEE-NPSS Real Time Conference, Montreal, Jul.2003
- [57] *Virgo data acquisition system and Online Monitoring tools*, Note Virgo en cours
Virgo data acquisition and online monitoring, to be published in Nucl. Inst. and Methods Phys. Res. A
- [58] *Control System Upgrade of the VIRGO interferometer. Timing Interface & Optical Links*, Virgo Note VIR-NOT-LAP-1390-278
- [59] *Vega, an environment for gravitational waves data analysis*, Int. Journal of Modern Physics D9 Issue 3 (2000) 293
- [60] *Data Analysis Software tools used during VIRGO engineering runs, review and future needs*, Nucl. Inst. and Methods Phys. Res. A502 (2003) 347-352.
- [61] *Frame Vector library documentation* : <http://wwwcascina.virgo.infn.it/sDoc/virgoApp/Frv>
- [62] *Search for glitches events during E2, E3 and E4*, VIR-NOT-LAP-1390-230 (2003).
- [63] *Search for non-Gaussian events in the data of the VIRGO E4 engineering run*, The VIIth Gravitational Wave Data Analysis Workshop, Kyoto, Japan, 17-19 December 2002, Class. Quantum Grav. 20 Issue 17 (2003) 623-632
online version : <http://stacks.iop.org/cqg/20/i=17>
- [64] *Testing the detection pipelines for inspirals with Virgo commissioning run C4 data*, Proceedings of the IXth GWDAW, Annecy, France, 15-18 Dec. 2004
Class. Quantum Grav. 22 Issue 18 (2005) 1139-1148
- [65] *A first study of environmental noise coupling to the Virgo interferometer*, Proceedings of the IXth GWDAW, Annecy, France, 15-18 Dec. 2004
Class. Quantum Grav. 22 Issue 18 (2005) 1069-1077
- [66] *Testing Virgo Burst detection tools on commissioning run data*, Acernese et al., Class. Quantum Grav. 23 (2006) 197-205
Virgo Data Analysis for C6 and C7 engineering runs, Acernese et al., proceedings of XIth Marcel Grossmann Meeting (2006).
- [67] *Data quality and Virgo detector characterization for the GW burst search*, to appear in proceedings of XLIInd Rencontres de Moriond, 1-18 mars 2007
All-sky search for GW bursts in C7 Virgo commissioning run, to appear in proceedings of XLIInd Rencontres de Moriond, 1-18 mars 2007
- [68] *Comparison of filters for detecting gravitational wave bursts in interferometric detectors*, N. Arnaud et al., Phys. Rev. D 67 (2003) 062004

Annexe A

The VIRGO Online Data Selection, a proposed off-line data analysis environment and an algorithms interface for GW Data Analysis

Cette annexe reproduit le résumé de ma présentation sur les outils d'analyse et de traitement en ligne développés pour Virgo.

Paru sous la référence :

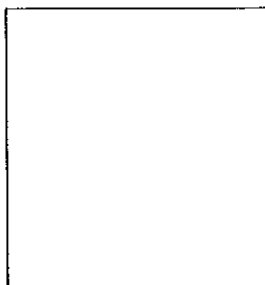
The VIRGO Online Data Selection, a proposed off-line data analysis environment and an algorithms interface for GW Data Analysis, F. Bellachia, D. Buskulic, L. Derome, F. Marion, A. Masserot, B. Mours, D. Verkindt dans Proceedings of XXXIVth Rencontres de Moriond, Gravitational Waves and Experimental Gravity, (Les Arcs, 23-30 Janvier 1999)

Cet article comporte notamment la description d'un outil (General Algorithm Interface) que j'ai développé pour la collaboration Virgo et qui fut le précurseur de la librairie "FdIO", élément de la librairie "Fd" décrite au paragraphe 4.3.

**THE VIRGO ONLINE DATA SELECTION,
A PROPOSED OFF-LINE DATA ANALYSIS ENVIRONMENT
AND AN ALGORITHMS INTERFACE FOR GW DATA ANALYSIS**

F. BELLACHIA, D. BUSKULIC, L. DEROME, F. MARION, A. MASSEROT, B. MOURS, D.
VERKINDT

*LAPP, Chemin de Bellevue, BP 110
74941 Annecy-le-Vieux, France , email: verkindt@lapp.in2p3.fr
presented by D. VERKINDT*



In Interferometric Gravitational Waves Experiments like VIRGO or LIGO, developing algorithms for off-line or online (data selection) search of a gravitational wave signal needs data analysis software environments. It would also benefit of a common data format, already available, and of a common interface between algorithms and data analysis environments. We describe here an off-line data analysis environment based on ROOT, a first version of the VIRGO online data selection and a preliminary version of algorithms interface common to these two types of data analysis environment.

1 Introduction

In the near future, many physicists working on gravitational waves interferometric detectors will be involved in the development of algorithms searching for gravitational wave signal in off-line analysis and online data selection. They will use different data analysis software environments: interactive like Matlab or ROOT¹, using simulated data or not, or non interactive like long computing tasks (production mode) or online processing tasks (data selection, data quality). To make different algorithms written by different people from different scientific communities speak the same language, a convenient way could be the definition of a standard interface between the algorithms and the different data analysis environments.

We first describe here the scheme of the VIRGO online data selection, then a proposed interactive data analysis environment: VEGA, and finally some proposed guidelines for an algorithms interface common to those two types of data analysis environments.

2 The VIRGO online data selection

The VIRGO experiment will face a huge data flow from data acquisition² which is at least 2.6 MBytes per second (see figure 1). That means about 225 GBytes per day and makes data analysis quite unmanageable. To solve this problem, we would like to reduce the amount of data stored by the Data Distribution system and to improve the off-line data analysis performances, without rejecting any data needed for off-line analysis. This data reduction of, hopefully, two orders of magnitudes will be the task of the Online Data Selection.

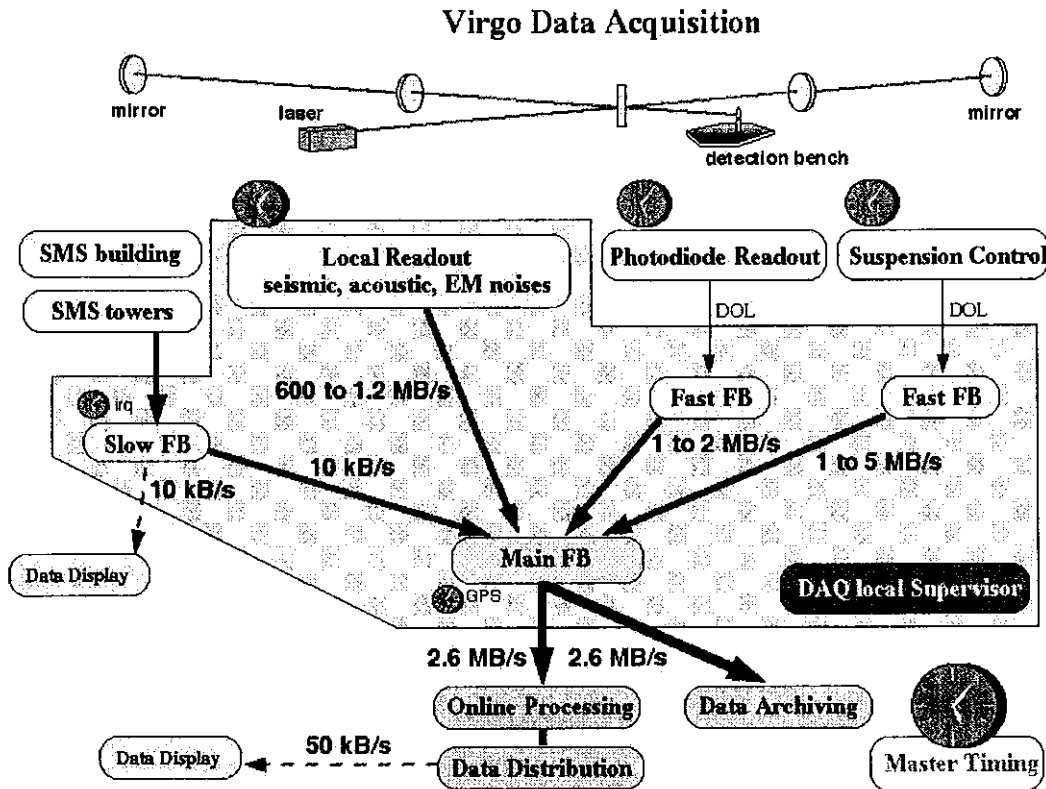


Figure 1: Simplified scheme of the VIRGO data acquisition system. The VIRGO data acquisition is mainly composed of 3 parts: a front end acquisition (Photodiodes Readout, Slow Monitoring Stations, Local Readouts, etc...), a formatting acquisition (Fast Frame Builder, Slow Frame Builder, Main Frame Builder) in charge of putting data into the frame format, and an online processing part (Data Archiving, Data Selection, Data Distribution,...). A timing system is in charge of synchronizing mainly all the front-end acquisition.

This task will be implemented as shown on figures 2 and 3. The VIRGO data acquisition is mainly composed of 3 parts:

1. **a front end acquisition:** Photodiodes Readout recording the output signal of the interferometer, Slow Monitoring Stations for building and vacuum control, Local Readouts for environment monitoring (acoustic, electromagnetic, seismic noises), etc... in charge of taking data coming out of the ADC's.
2. **a formatting acquisition:** Fast Frame Builder, Slow Frame Builder, Main Frame Builder) in charge of putting data into the frame format^{4 3} (the common data format adopted by the VIRGO and LIGO experiments)
3. **a online processing:** Data Archiving, h Reconstruction, Data Selection, Data Distribution, etc..., in charge of data storage, data pre-selection and distribution.

The Main Frame Builder is the central part of the VIRGO data acquisition system. It sends frames to the data archiving and to the data quality check (first task of the online processing). The resulting frames are sent to the reconstruction task that builds calibrated data (h strain), which are the main input of the algorithms used by the online data selection system.

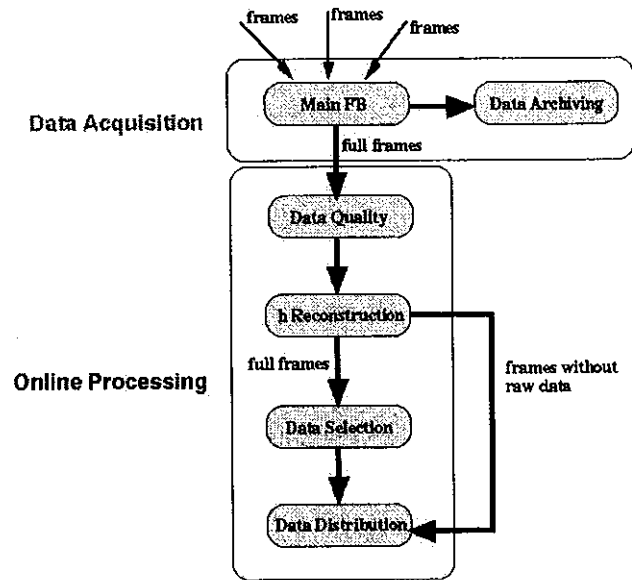


Figure 2: The online processing tasks and the online data selection working principle.

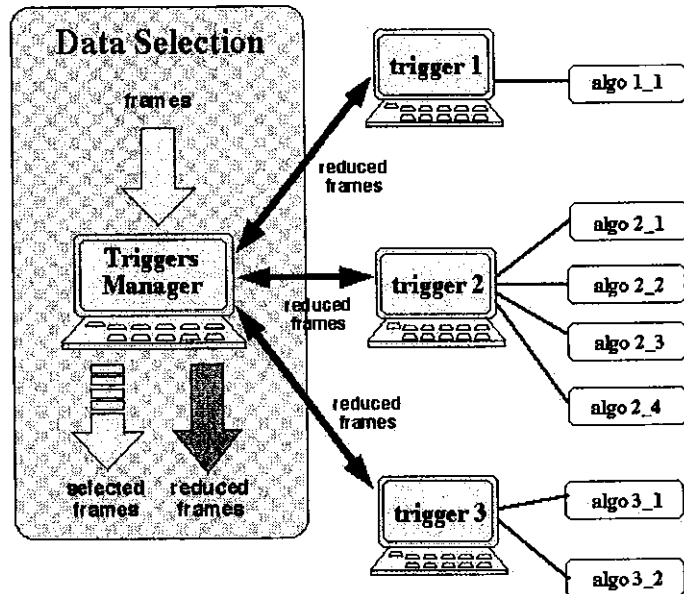


Figure 3: The "Triggers Manager" in charge of the online data selection exchanging reduced frames with the different trigger applications in charge of the algorithms.

As shown on figure 2, the online data selection working principle is to convey raw data in the case one of the data selection algorithms has triggered, and a reduced set of data otherwise.

Figure 3 shows that a workstation, the "Triggers Manager", is in charge of taking input frames, making a reduced copy of them (that does not contain the raw data) and sending those reduced frames to several workstations (trigger1, trigger2, trigger3, etc...), each in charge of one or several algorithms. Frames containing only the results of the algorithms are sent back to the "Triggers Manager" that, according to those results, selects the full frames to be sent to the Data Distribution system.

This selection of data subsets should be sufficiently loose to keep all the signals that could be seen by off-line analysis and sufficiently tight to reduce by at least a factor 10 the amount of data stored in the Data Distribution system and analysed off-line.

Two ways to exchange data between a trigger application and one of its algorithms are foreseen for now: frame (a more convenient way for complex data analysis algorithms) or vector (more user friendly for algorithm developers), that is a n-Dim array of data associated with some useful information (typically: a FrVect structure of the frame format³).

3 A proposed interactive environment: VEGA

Before running signal search algorithms in online selection or off-line production mode, we need to prototype and test those algorithms. For these purposes, an interactive off-line software environment is needed, that allows to visualize data, to manipulate data quite easily and to give the possibility to call algorithms with simple "plug-ins".

ROOT is a Data Handling Environment for High Energy Physics. It is developed at CERN, used officially by many experiments like NA49 and ALICE at CERN, CDF at Fermilab, STAR and PHENIX at BNL, and has user support sites at CERN, Fermilab and BNL. It uses an object oriented language (C++), it has a lot of convenient tools for graphical and interactive data analysis. And, key feature, it uses a C/C++ interpreter that allows C or C++ to be used as command language: this makes the ROOT macros or the interactive commands identical to C or C++ programs.

We have initiated the development of a custom version of ROOT¹: VEGA (Visual Environment for Gravitational waves data Analysis), It is a custom version of ROOT in the sense that it makes ROOT able to read frames (using the functions provided by the Frame Library³). The few lines below show an interactive session where data under frame format are read and plotted included the result of an algorithm that was interfaced to VEGA. The result of those VEGA command lines is shown on figure 4.

```
TCanvas* canvas = new TCanvas("canvas","Vega Example");
can->Divide(2,2);
FrFile f("demo.dat")           /* open the file containing frames */
FrameH* frame = FrameRead(f)    /* load first frame of the file */
VSeries v(frame,"adc.ADC0")     /* extract a signal from this frame */
canvas->cd(1);
v.Draw()                        /* draw content of signal v */
canvas->cd(2);
v.Draw(myAlgoFFT,120,500)       /* draw result of an algorithm applied on signal v */
canvas->cd(3);
v.DrawHist()                   /* draw distribution of signal v */
```

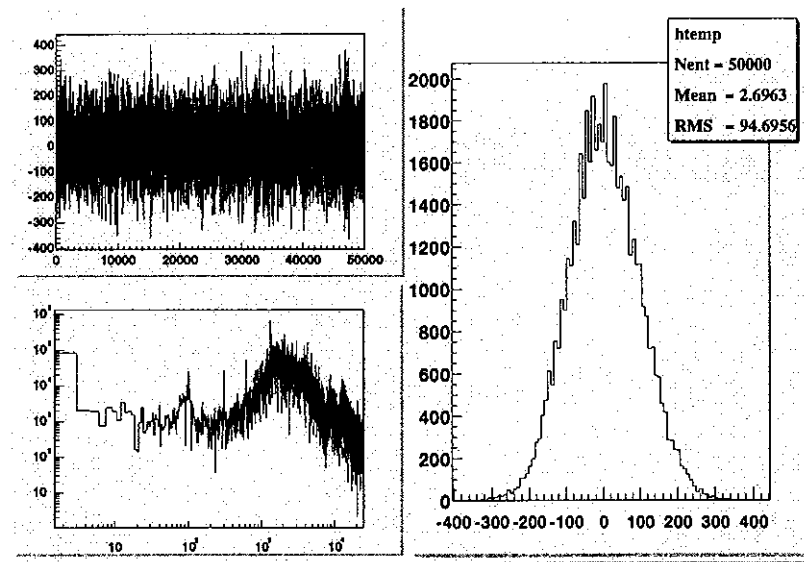


Figure 4: *Some plots showing the result of an interactive session of VEGA.*

4 A preliminary algorithms Interface

We try to define here a standard interface giving the possibility to develop data analysis algorithms the same way for different environments like online data selection, off-line production mode, off-line interactive mode, tests of algorithms using simulated data, etc...

This standard interface should give the possibility to easily plug an algorithm to those various environments, so the possibility to re-use it in different places.

4.1 Guidelines and API's

Trying to define a "standard" interface faces the problem of defining some rules. Some preliminary guidelines for the algorithms developers are asserted here:

- **Language:** Algorithm should be written in Object Oriented style (for instance C or C++), in order to have flexibility and a simplified maintenance.
- **Configuration:** Configuration parameters are passed to the algorithm using a easy handling way (for instance a character string).
- **Data exchange:** Algorithm's inputs and outputs should be limited to some standard types (like frames or vectors).
- **Isolation:** Algorithm should not change the input data, in order to keep an isolation between the input and output data.
- **Output structure:** Algorithm's results, when put back into a frame, should be stored in a specific structure (like the FrTrigData structure³).

A basic C structure is used by the algorithms interface. Some utilities and API (Application Programming Interface) are provided to extract the algorithm configuration parameters, to create and fill this basic C structure and to exchange data between the algorithm and external environment. Moreover, some utilities to do statistics on the algorithm results and a short library of basic functions (FFT, FWT, Transfer Function, Correlation Function...) will be provided.

4.2 Some specifications to plug an algorithm

As we have seen, the algorithms interface requires C or C++ and, for C case, is mainly based on a basic C structure. But to use an algorithm, we first need to fill this C structure that means to get a configuration. Then, we must define input data format and output data format. More informations can be found in a Virgo Note⁵.

Algorithm Configuration

The algorithm's configuration is set by parameters stored in a basic C structure provided by the algorithms interface and completed by the algorithm developer. From the user point of view and for what concerns the online data selection, the configuration is a character string passed to the interface (which decodes it and puts the parameters into the basic C structure). This character string is made of keywords, each followed by at least one parameter, like for instance:

```
"name BinaySearch input h massmin 0.8 massmax 4.0 freqmin 35."
```

The API provided to create the basic algorithm structure: `UserAlg *alg = UserAlgNew(char *paramString)`, is also the one which decodes this character string.

Input and Output Format

The input and output data format of the algorithm should be quite standard and we have chosen for now two possibilities: frame or vector. In the "frame" case, the algorithm is embedded in a function that takes a frame as input and returns its results in a frame:

```
FrameH *frameOut = UserAlgProc(UserAlg *alg, FrameH *frameIn,...)
```

The same type of function is available for the "vector" case (see documentation⁵).

5 Conclusion

The VIRGO experiment has begun to look at the implementation of signal search algorithms for off-line or online use, and LAPP has been developing an off-line data analysis environment, VEGA, a preliminary VIRGO online data selection system and a preliminary algorithms "standard" interface for this purpose. LIGO is also working on such algorithms interface specifications and the hope is that future will be devoted to exchange of ideas between the two experiments in order to have algorithms interfaces in VIRGO and LIGO quite similar.

Acknowledgments

We would like to thanks people from VIRGO and LIGO experiments for fruitful discussions.

References

1. Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Sept. 1996, Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A 389 (1997) 81-86. See also <http://root.cern.ch>
2. Virgo DAQ system, C. Arnault et al., presented by F. Chollet, Proceedings Xth Real Time Conference, Beaune, Sept. 1997
3. "Specification of a Common Data Frame Format for Interferometric Gravitational Wave Detectors", Virgo Note VIR-SPE-LAP-5400-102 and Ligo Note LIGO-T970130-B. "Frame's Library User's Manual", Virgo Note VIR-MAN-LAP-5400-103 (v3.72). See also <http://wwwlapp.in2p3.fr/virgo/FrameL>
4. B.Mours, Gravitational Wave Detection, Proceedings of the TAMA International Workshop on Gravitational Wave Detection, Saitama, Japan, November 12-14 1996, edited by K.Tsubono, M.K.Fujimoto and K.Kuroda (1997)
5. "A Proposal for Data Analysis Algorithms Software Specifications", Virgo Note VIR-SPE-LAP-5400-106

Annexe B

Data acquisition and online processing for the Virgo experiment

Cette annexe reproduit le résumé de ma présentation sur l'acquisition de données et le traitement en ligne de l'expérience Virgo.

Paru sous la référence :

Data acquisition and online processing for the Virgo experiment. Verkindt D., Bellachia F., Flaminio R., Fournier L., Marion F. et al, dans Proceedings of IXth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, (Roma, 2-8 juillet 2000) - part c (2002) 1925-1926

DATA ACQUISITION AND ONLINE PROCESSING FOR THE VIRGO EXPERIMENT

D. VERKINDT, F. BELLACHIA, R. FLAMINIO, L. FOURNIER,
F. MARION, A. MASSEROT, B. MOURS
LAPP, Chemin de Bellevue, BP110, 74940 ANNECY-LE-VIEUX, FRANCE

Gravitational Waves Experiments like Virgo will acquire a large amount of data. The scheme of the data acquisition currently installed on Virgo site and the planned Online Processing (h reconstruction, data quality and Online preselection) aiming at the data flow reduction are described.

1 Virgo Data Acquisition

1.1 Introduction

A 3km long interferometric detector like Virgo needs to acquire interferometer output data and environment monitoring data according to some specifications:

- Some parts of data acquisition will be 3 km away. We may need optical fibers.
- Some environment monitoring at 20 kHz is assumed.
- Interferometer feed-back loops data must be monitored.
- all the data acquisition must be synchronized.
- the recorded data format if frames ².

This implies to implement some specific hardware and software.

1.2 General scheme

Virgo Data Acquisition has been subdivided into three parts ³:

- data from the output of the interferometer (detection bench)
- data from alignment and feed-back systems (controls)
- data from environment monitoring

This gives us the advantage of quasi-independent data acquisitions implying some flexibility in the debugging before and during the commissioning steps.

All the data acquisition is synchronized using a home made timing system based on a GPS board, a set of timing boards and optical fibers. The timing system delivers a base clock at 2 MHz, a sampling frequency of 20 kHz and a frame frequency of 1 Hz.

For each of the three data acquisition parts, data are formatted into frames ² and sent on 100 Mbps Ethernet network by dedicated softwares: the Frame Builders.

1.3 The Frame Builders

Depending of the source of data, different types of frames builders are used in Virgo:

- **Local Readouts:** they are in charge of collecting environment monitoring data from the different parts of the interferometer: central part, Mode Cleaner building and end of each arm. Such a frame builder gets data directly from

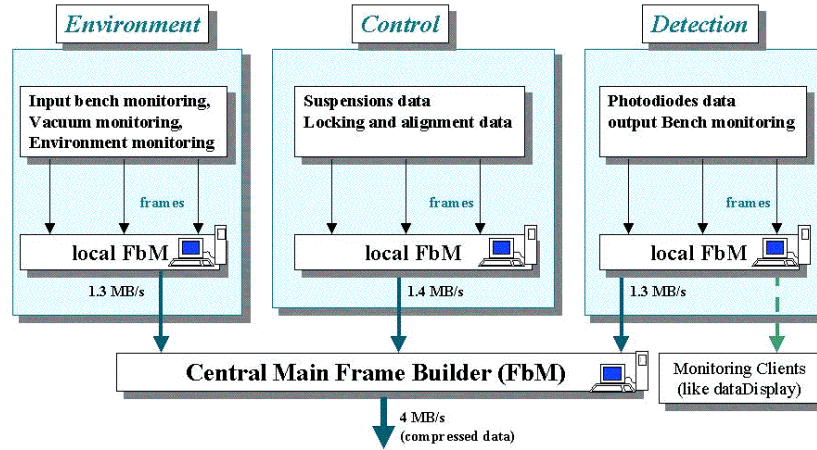


Figure 1. General scheme of the Virgo Data Acquisition.

ADC's and is timed by the Virgo timing system.

- **Fast Frame Builders:** they are in charge of reading data from detection bench or from suspensions and global control of the interferometer. They take data from optical fibers using home made DOL (Digital Optical Link) boards. This is necessary mainly because the systems sending data to Fast Frame Builders (photodiodes readout, global control and suspensions) are involved in the feed-back loops and do not have the time to build frames as did the Local Readout system.
- **Slow Frame Builders:** they are in charge of collecting below 1 Hz the slow monitoring data from various points: temperatures, vacuum status (pressures, gate positions), laser status, etc... They collect data through the network as ASCII data strings.
- **Main Frame Builders:** they are in charge of collecting the frames coming from the previous frame builders, through Ethernet. 100 Mbits and 1 Gbit Ethernet have been chosen instead of mirror memory because it is quite standard and lower price. For each of the three data acquisition parts, one "local" Main Frame Builder is in charge of collecting the frames and merging them every second in a single frame. They send those frames to a Central Main Frame Builder (figure 3) that merges them into final frames (about 4 MB/s of compressed data) that will be put in Data Archiving and sent to the Online Processing. All the Main Frame Builders use shared memory as described in figure ??.
- **Trend Frame Builder:** this application is in charge of collecting the slow monitoring data and the trend data (see 2.2) and to pack them into long frames (trend frames), 1 hour long, containing vectors with consecutive data

of each slow monitoring or trend data channel. Those "trend frames", about 50 MBytes in size allows to read months of data easily and rapidly.

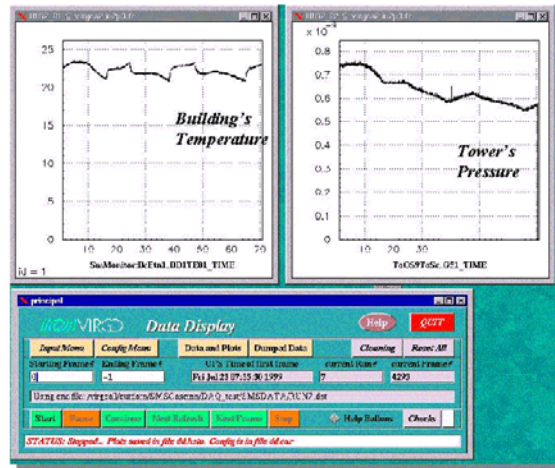


Figure 2. An example of Slow Monitoring Data viewed with Virgo data Display.

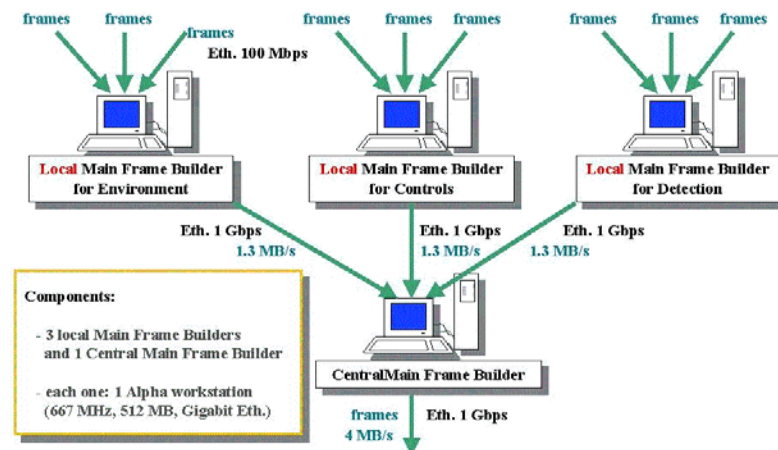


Figure 3. The Main Frame Builders of Virgo Data Acquisition.

1.4 Dynamical connection scheme

Almost all data acquisition hardware and software is now installed on Virgo site and tests are under way with the detector parts that can already deliver data.

A general philosophy has been adopted for the data acquisition at the level of frame builders: **the dynamical connection**. It allows some flexibility. Data acquisition is then like a tool box, each tool independent of the others. In practice, any user trying to connect to a frame builder (for instance with a data display) first sends a request to it through the network in order to be added as a consumer of this frame builder. In this request, a selection of data channels can be made. Then, the user receives just the data requested instead of the complete frames (figure 4.1).

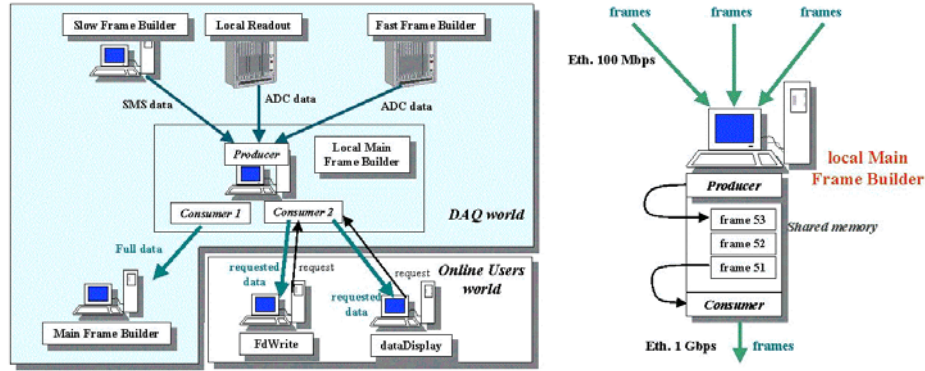


Figure 4. (1) Scheme of the separation between data acquisition's world and user's world introduced by dynamical connection and the use of shared memory. (2) Main Frame Builder using shared memory. A producer application is in charge of writing received frames in shared memory. Several consumers (among which one is dedicated to the main data stream) read frames in shared memory and send them on the network.

Moreover a separation is made between the data acquisition's world and the user's world by dividing each Main Frame Builder into two independant processes that communicate through a shared memory. (see figure 4.2).

2 Virgo Online Processing

Once data (under frame format) have been collected and written in Data Archiving system ⁴, they must also be processed online (figure 5). First step of this processing is the calibration of the data (reconstruction of equivalent gravitational wave strain h) and the check of their quality (essentially by using environment monitoring data).

Last step is the reduction of the amount of data before any offline data analysis. This is the purpose of the Online Preselection.

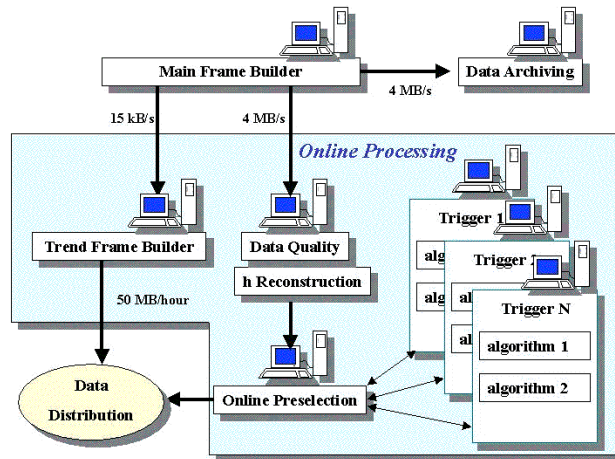


Figure 5. General scheme of Virgo Online Processing.

2.1 h Reconstruction

Virgo has planned to build a calibration system, based on a laser beam pushing one of the interferometer's mirrors while modulated by a known signal. By measuring the output signal of the interferometer, during those calibration runs, we can build the transfert function that will allow to reconstruct from the physics runs output data the corresponding h values. A workstation dedicated to this task has been installed on Virgo site and the corresponding software is under development.

2.2 Data Quality

When the interferometer is not locked or when some extra noise has been detected, data are tagged in order to prevent them from being selected by the Online Preselection and, moreover, to give faster and easier checks in the offline data analysis. Data Quality will also help during the first steps of interferometer's commissioning and running, where the understanding of noises will be crucial.

A set of algorithms is under development and will be adapted according to the types of noise that Virgo will encounter. In addition to this online processing task, a more front-end data quality monitoring will be done, using for instance trend data (that are statistical summary informations about each data channel in each frame (figure 6)).

2.3 Online Preselection

The purpose of the Online Preselection is to reduce to amount of data to be analysed offline. This is done by running simple algorithms which, with the present computing power, could achieve online a first data analysis⁷, searching for bursts and coalescing binaries signals and selecting thus finely some candidates.

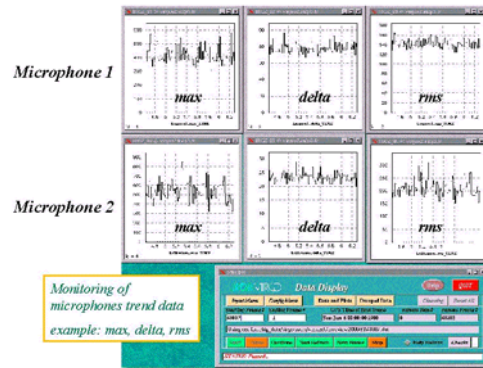


Figure 6. An example of display of Virgo trend data.

A flux of 4MB/s means about 345 GB per day and 126 TB per year. Using the Online Preselection, we aim at reducing this amount to a maximum of 5 TB per year, with the hope to go below 1 TB per year.

The current general architecture of the Virgo Online Preselection is described on figure 7. A master/slaves approach has been adopted, where a central machine and software (Trigger Manager) is in charge of receiving frames, sending specific data (h values) to each node of a cluster of machines, receiving algorithms results and selecting the frames to be fully sent to Data Distribution⁸ and to Data Summary Tapes.

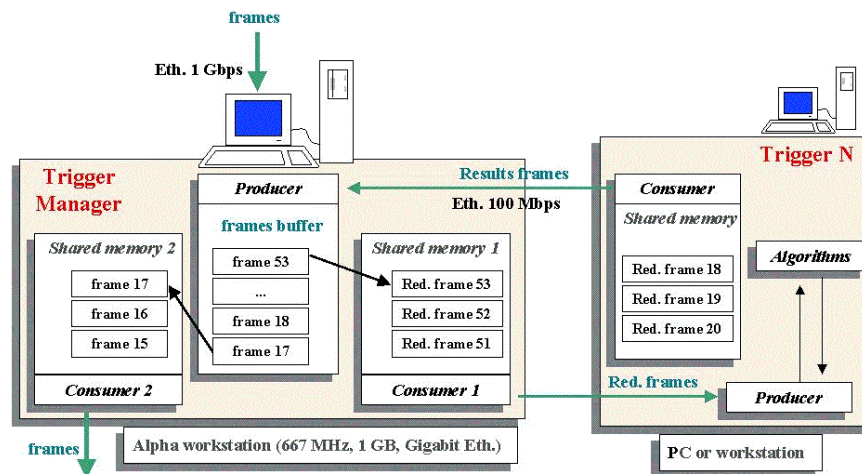


Figure 7. Scheme of the Online preselection, based on the same shared memory principle as the Main Frame Builders.

Each node is a machine on which runs a "trigger" software (some interface to the algorithms running on this machine). This "trigger" gets data from the Trigger Manager, provides each algorithm with required data, gets the results of each algorithm and sends them back to the Trigger Manager. Some software specifications have been defined for the implementation of algorithms in the trigger^{9 10}.

The whole system is based on a 100 Mbps Ethernet network and TCP/IP communication protocol. A home made tool⁵⁶ (the same as the one used between DAQ frame builders) is used to communicate between the cluster's nodes and the Trigger Manager.

Since July, the Trigger Manager workstation (Alpha XP1000 667 MHz) and two cluster nodes have been installed on the Virgo site.

3 Conclusion

The Virgo Data Acquisition is on the way to be complete. Hardware is installed and software is currently under optimization and long term tests. It is based on Ethernet 100 Mbps and 1 Gbps networks, the use of frame format and Frame Builders. Shared memory and dynamical connection philosophy allows any user to monitor data easily without disturbing the data acquisition main stream.

The Virgo Online Processing workstations are already installed on Virgo site. Softwares for h Reconstruction, Data Quality check and Online Preselection are under development. First tests of the Online Preselection will be done at the beginning of 2001 and a first cluster of about 10 nodes will be installed on Virgo site during the year 2001.

Acknowledgments

We would like to thank all the Virgo members who have contributed to the Data Acquisition and Online Processing of Virgo.

References

1. Virgo Collaboration, Final Conceptual Design 1997.
2. B. Mours, "Specification of a Common Data Frame Format for Interferometric Gravitational Wave Detectors", Virgo Note VIR-SPE-LAP-5400-102 and Ligo Note LIGO-T970130-B.
"Frame's Library User's Manual", Virgo Note VIR-MAN-LAP-5400-103 (v4r11).
See also <http://wwwlapp.in2p3.fr/virgo/FrameL>
3. D. Verkindt et al. "Data Acquisition schemes", Virgo Note April 2000, VIR-MAN-LAPP-5400-110.
4. "Data Archiving system", Virgo Note VIR-MAN-LAL-5400-xxx
5. "Frames Distribution", Virgo Note VIR-SPE-LAP-5400-105
6. "A Multitask Communication package", Virgo Note VIR-MAN-LAL-5400-xxx
7. Fast trigger algorithms for binary coalescences, *Astroparticle Ph.* 2 (1994) 235-248

8. "Data Distribution system", Virgo Note VIR-MAN-LAL-5400-xxx
9. F. Bellachia et al., "The Virgo Online Data Selection, A proposed off-line data analysis environment and an algorithms interface for GW data analysis", Proceedings of XXXIVth Moriond Conference, 1999.
10. "Online Data Processing Software Specifications", Virgo Note VIR-SPE-LAP-5400-108, 1999

Annexe C

Data Acquisition System of the Virgo Gravitational Waves Interferometric Detector

Cette annexe reproduit le résumé de ma présentation sur l'acquisition de données et les outils de surveillance en ligne du détecteur Virgo.

A paraître sous la référence :

Data Acquisition System of the Virgo Gravitational Waves Interferometric Detector, F. Acernese et al., Virgo collaboration, dans Proceedings of the XVth IEEE NPSS Real Time Conference 2007, Fermilab, (Batavia, USA, 28 Avril - 4 Mai 2007)

Data Acquisition System of the Virgo Gravitational Waves Interferometric Detector

F. Acernese⁶, P. Amico¹⁰, M. Alshourbagy¹¹, F. Antonucci¹², S. Aoudia⁷, P. Astone¹², S. Avino⁶, D. Babusci⁴, G. Ballardini², F. Barone⁶, L. Barsotti¹¹, M. Barsuglia⁸, Th. S. Bauer¹³, F. Beauville¹, S. Bigotta¹¹, S. Birindelli¹¹, M.A. Bizouard⁸, C. Boccara⁹, F. Bondu⁷, L. Bosi¹⁰, C. Bradaschia¹¹, S. Braccini¹¹, F. J. van den Brand¹³, A. Brillet⁷, V. Brisson⁸, D. Buskulic¹, E. Calloni⁶, E. Campagna³, F. Carbognani², F. Cavalier⁸, R. Cavalieri², G. Cella¹¹, E. Cesarini³, E. Chassande-Mottin⁷, N. Christensen², C. Corda¹¹, A. Corsi¹², F. Cottone¹⁰, A.-C. Clapson⁸, F. Cleva⁷, J.-P. Coulon⁷, E. Cuoco², A. Dari¹⁰, V. Dattilo², M. Davier⁸, M. del Prete¹¹, R. De Rosa⁶, L. Di Fiore⁶, A. Di Virgilio¹¹, B. Dujardin⁷, A. Eleuteri⁶, M. Evans², I. Ferrante¹¹, F. Fidecaro¹¹, I. Fiori², R. Flaminio^{1,2}, J.-D. Fournier⁷, S. Frasca¹², F. Frasconi¹¹, L. Gammaitoni¹⁰, F. Garufi⁶, E. Genin², A. Gennai¹¹, A. Giazotto¹¹, G. Giordano⁴, L. Giordano⁶, R. Gouaty¹, D. Grosjean¹, G. Guidi³, S. Hamdani², S. Hebri², H. Heitmann⁷, P. Hello⁸, D. Huet², S. Karkar¹, S. Kreckelbergh⁸, P. La Penna², M. Laval⁷, N. Leroy⁸, N. Letendre¹, B. Lopez², Lorenzini³, V. Loriette⁹, G. Losurdo³, J.-M. Mackowski⁵, E. Majorana¹², C. N. Man⁷, M. Mantovani¹¹, F. Marchesoni¹⁰, F. Marion¹, J. Marque², F. Martelli³, A. Masserot¹, M. Mazzoni³, L. Milano⁶, F. Menzinger², C. Moins², J. Moreau⁹, N. Morgado⁵, B. Mours¹, F. Nocera², C. Palomba¹², F. Paoletti², 11, S. Pardi⁶, A. Pasqualetti², R. Passaquieti¹¹, D. Passuello¹¹, F. Piergiovanni³, L. Pinard⁵, R. Poggiani¹¹, M. Punturo¹⁰, P. Puppo¹², S. van der Putten¹³, K. Qipiani⁶, P. Rapagnani¹², V. Reita⁹, A. Remillieux⁵, F. Ricci¹², I. Ricciardi⁶, P. Ruggi², G. Russo⁶, S. Solimeno⁶, A. Spallicci⁷, M. Tarallo¹¹, M. Tonelli¹¹, A. Toncelli¹¹, E. Tournefier¹, F. Travasso¹⁰, C. Tremola¹¹, G. Vajente¹¹, **D. Verkindt**¹, F. Vetrano³, A. Viceré³, J.-Y. Vinet⁷, H. Vocca¹⁰ and M. Yvert¹

¹Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules (LAPP), IN2P3/CNRS, Université de Savoie, Annecy-le-Vieux, France;

²European Gravitational Observatory (EGO), Cascina (Pi), Italia;

³INFN, Sezione di Firenze/Urbino, Sesto Fiorentino, and/or Università di Firenze, and/or Università di Urbino, Italia;

⁴INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, Frascati (Rm), Italia;

⁵LMA, Villeurbanne, Lyon, France;

⁶INFN, sezione di Napoli and/or Università di Napoli "Federico II" Complesso Universitario di Monte S. Angelo, and/or Università di Salerno, Fisciano (Sa), Italia;

⁷Departement Artemis – Observatoire de la Côte d'Azur, BP 42209 06304 Nice, Cedex 4, France;

⁸LAL, Univ Paris-Sud, IN2P3/CNRS, Orsay, France

⁹ESPCI, Paris, France;

¹⁰INFN, Sezione di Perugia and/or Università di Perugia, Perugia, Italia;

¹¹INFN, Sezione di Pisa and/or Università di Pisa, Pisa, Italia;

¹²INFN, Sezione di Roma and/or Università "La Sapienza", Roma, Italia.

¹³NIKHEF, NL-1009 DB Amsterdam and/or Vrije Universiteit, NL-1081 HV Amsterdam, The Netherlands

Abstract—Virgo is an experiment aiming at the detection of gravitational waves emitted by astrophysical sources. Its detector, based on a 3km arms interferometer, is a complex setup which requires several digital control loops running up to 10kHz, an accurate and reliable central timing system and an efficient data acquisition, all of them being distributed over 3km. We overview here the main hardware and software components developed for the data acquisition system (DAQ) and its current architecture. Then, we briefly discuss its connections with interferometer's controls, especially through the automation of the interferometer's startup procedure. Then, we describe the tools used to monitor the DAQ and the performances we measured with them. Finally, are described also the tools developed for the online detector monitoring, mandatory complement of the DAQ for the commissioning of the Virgo detector.

I. INTRODUCTION

The Virgo experiment [1][2] aims at the detection of gravitational waves of astrophysical origin by using a suspended Michelson interferometer with 3 km arms length. The commissioning of this interferometric detector reaches currently its end and the sensitivity of the apparatus is approaching the aim requested for a possible gravitational wave detection, in a bandwidth spanning from a few Hertz to several kiloHertz. As shown on Fig.1, Virgo detector is a Michelson interferometer using a 20 W Nd:YAG laser stabilized in power and frequency and an injection system that includes an input mode-cleaner (a 3 mirrors cavity maintained

resonant on the laser TEM00 mode). The detection system includes a set of detection photodiodes and an output mode-cleaner that improves the dark fringe contrast. The main improvements with respect to a simple Michelson are 3 km long Fabry-Perot cavities in each arm that increase up to 100 km the optical arms length and a recycling mirror that increases the light power inside the interferometer. Once the interferometer is set on its working point (optical cavities resonant and interference kept on the dark fringe), the arms length modification due to a gravitational wave is detected by apparition of light at the interferometer's output.

To reduce as much as possible the environmental noises that could affect the dark fringe signal, the main components of the interferometer are placed under vacuum and the mirrors are suspended under sophisticated anti-seismic suspensions that reduce the horizontal seismic motion by a factor 10^{14} above 10 Hz [3]. The input and output mode-cleaner needs to be seismically isolated and are thus also suspended.

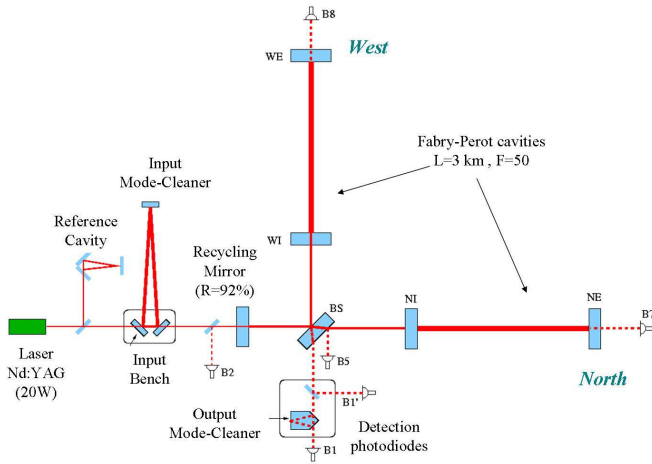


Fig. 1. Optical configuration of the Virgo interferometer.

Such a long base-line interferometer needs a data acquisition system [4][5] able to collect in a coherent way all the data needed for the signal extraction and the qualification of the detector. This requires a site wide timing system and several dedicated readouts interfaced with the control loops distributed over the site. It requires also tools to format, transport and write the data. Also mandatory are online monitoring tools to display and analyse in real time the state of the detector.

In detection configuration, the Virgo interferometer requires many control loops, that need to be developed and tuned [6][7]. Since most of those controls are digital, the data acquisition (DAQ) has strong connections with them: on one hand, the timing system of the DAQ is the same as the one used to drive the controls, on the other hand, the digitized control loop signals are often collected synchronously by the DAQ. This put an additional strong constraint on the DAQ: to not disturb the digital controls. Given the

complexity of the interferometer, the control systems have continuously evolved during the commissioning phase, with an increasing number of controls being turned on and a continuous noise hunting leading to a regular improvement of the detector sensitivity. This puts also flexibility and scalability constraints on the data acquisition. Finally, the DAQ has to challenge a strong request of reliability because the detector should be operated 24 hours per day, all year long.

We first overview, in section II, the standard and custom components of the DAQ chosen under those constraints. Then, section III describes the current architecture of the data acquisition, including online data access and online data processing set up with the DAQ software tools. Section IV is a short description of the two control setups which has strong connections with DAQ: the interferometer's control loops and the automation of the interferometer's locking procedure. Then, section V focuses on the DAQ monitoring and on the DAQ performances measured. Finally, section VI deals with the main software tools developed for the online detector monitoring which is a mandatory complement of data acquisition.

II. STANDARD AND CUSTOM DAQ COMPONENTS

The choices made for the hardware and software components of the data acquisition have been guided by the constraints previously described and by the easiness of use and maintenance. Thus, whenever possible, standard solutions have been adopted for each DAQ hardware component. Moreover, based on those standard choices, a tool mandatory for the control of the interferometer and for the data acquisition has been developed: the timing system. Finally, a set of home-made libraries has been developed to provide plug-and-play DAQ software tools.

A. Standard components

For the front-end part, we use data transmission through optical links to reduce propagation delays and electromagnetic noise and VME numerical electronic boards associated with RIO8062 PowerPC CPU under LynXOS [8] to handle the real time of Virgo control loops and front-end data acquisition. In addition, home-made VME boards have been developed for the timing system [9], for the reception and transmission through optical links [10], for the suspensions control (DSP) [11] and for the CCD cameras readout used in local controls and beam shape measurements [12].

For data collection and online processing, we use workstations under Linux SL4, shared memories and Gigabit Ethernet with TCP/IP protocol to exchange the data between the processes. In addition, a set of home-made C libraries has been developed to easily propagate the large data flow of Virgo between DAQ processes. The choice of the C language was done in 1997 to use a well established standard.

B. The Virgo timing system

Control loops and data acquisition of a 3 km arms interferometer need to be synchronized over a large length scale. In addition, to guarantee a data analysis in coincidence with other interferometric detectors like LIGO [13], it is necessary to stamp the data with a common time reference.

To fulfill this requirement, a GPS based central timing system has been developed to synchronize the Virgo interferometer's controls and readouts. In addition, the GPS reference used to drive this timing system is cross-checked with a local Rubidium atomic clock. Details about the timing system can be found in [5].

Measurements have been done [14], within a Virgo-LIGO collaboration, to check the inter-experiment and end-to-end timing accuracy. First results are that LIGO and Virgo timing systems deliver a 1PPS signal with a jitter less than $1\mu\text{s}$ between each other and that the accuracy on the GPS time stamp difference between the two experiments is around 1 ms.

C. The DAQ libraries

The home-made libraries developed for timing and readout management have been described in [5]. Particular emphasis is given here to the home-made libraries developed for the data collection.

Once the data have been digitized and acquired synchronously thanks to front-end readouts paced by the timing system, they need to be formatted to be propagated on the Ethernet network and stored on disk. A data format for gravitational wave detectors has been developed since 1996 in the framework of a Virgo-LIGO collaboration [15]: the "frame" format. It has been adopted now by several other gravitational waves detectors all over the world. Two libraries, "Fr" and "Frv" [16], have been developed to manage the frame format and the vectors of data. All the DAQ and online processing make an extensive use of those two libraries. In addition, a Frame Distribution library "Fd" [17] has been developed to manage the input/output of the frame-formatted data. It is based on the use of a custom library (FdShm) [18] managing a shared memory and on the use of the "Cm" library [19] that encapsulates the TCP/IP Ethernet protocol. We have also created "FdIOServer", an elementary part of the DAQ shown on Fig. 2, that exchange frames through Ethernet or shared memory. Thanks to the "Fd" library, "FdIOServer" can easily embed any requested online processing algorithm. In addition, "Cfgr", a general purpose library, has been developed to handle mainly the parsing of configuration files and the exchange of informations with the graphical interface that controls and monitors the DAQ processes.

III. DATA ACQUISITION ARCHITECTURE

As shown on Fig.3, the Virgo data acquisition architecture can be split into three levels: the "front-end readouts", the "frame builders" and the "frame collectors". Those three levels have been mainly described in [5].

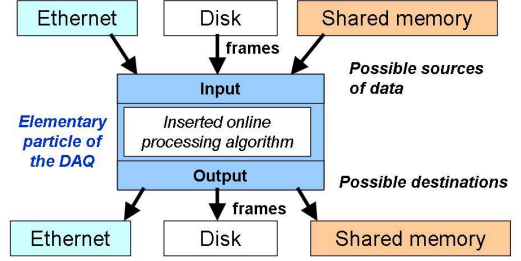


Fig. 2. Basic element of the data acquisition, created thanks to the "Fd" library. In this element can be introduced any online processing software developed in Virgo like for instance a resampling algorithm, a detector monitoring algorithm or an automation algorithm.

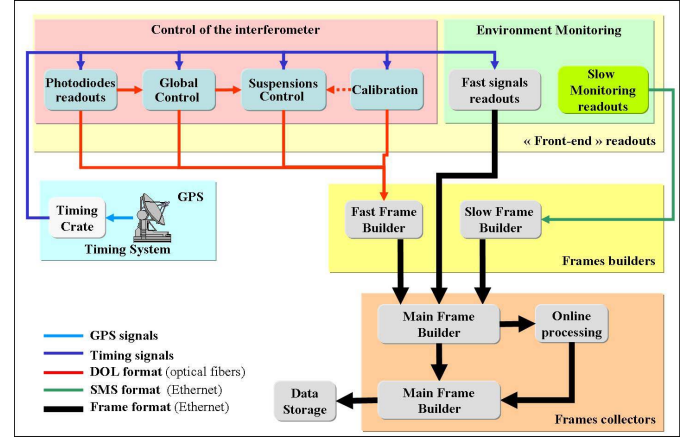


Fig. 3. General architecture of the Virgo data acquisition, with the 3 levels "front-end", "frame builders" and "frame collectors". Are also shown the GPS based timing system that rythms the front-end readouts and the various data format used.

- **First level:** The front-end readouts run on RIO8062 CPU. They are synchronized by the timing system and produce all the raw data acquired in Virgo. Some of them are also involved in the control loops and need to be reliable and fast enough. As a consequence, those processes do not build frames but send their data through optical links down to frame builders.
- **Second level:** The frame builders are a key feature of the data collection. They collect data from the various front-end readouts and put them under frame format. Two specific softwares have been developed in Virgo to this purpose: the "slow frame builder", that collects the slow monitoring data (sampling frequency ≤ 1 Hz), and the "fast frame builder", that collects all the fast channels from the front-end readouts. The fast frame builder run on RIO8062 CPU and uses a custom data compression algorithm to reduce by about 2.5 the size of the frames sent through Ethernet down to the frames collectors.
- **Third level:** The frame collectors, historically called "main frame builders", run on Linux workstations. They collect asynchronously the frames sent by several frames builders and merge them using the frame number. The

result of the merging is a frame written in a shared memory [18] and immediately available online for next steps of the DAQ chain or online data access purposes.

As can be seen on Fig.4, the main modifications with respect to the architecture described in [5] is that the raw data collected are used for the automation of the interferometer's locking procedure and also sent to several online processing tasks. In a last step, the results of the online processing are merged with the main data stream through a last frame collector (FbmSt) which sends the resulting frames down to data storage.

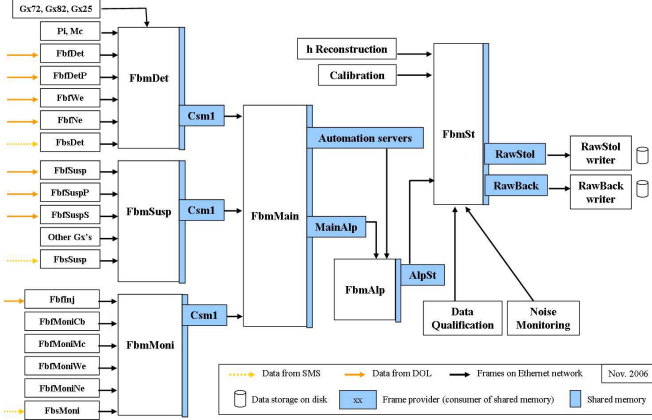


Fig. 4. Configuration of the data acquisition system in November 2006. Boxes at left aim at describing all the processes of the "front-end" and "frame builders" levels, that means about 110 processes distributed over 85 CPUs and DSPs. The data are collected by three upstream "frames collectors" FbmMoni, FbmSusp and FbmDet and passed to the automation system (FbmMain, Automation servers, FbmAlp). A last frames collector, FbmSt, adds to the main stream the data provided by the calibration system and by some of the online processing tasks (h Reconstruction, detector monitoring and noise monitoring). Data storage (RawStol) is securized by a parallel storage (RawBack).

A. Data streams and data access

Within this architecture, several data streams are produced. The main Virgo data stream is made of all the raw data collected through the three levels previously described. It represents today a total of about 2340 channels acquired (1370 fast channels and 970 slow monitoring channels), for a total data rate of about 20 MB/s (8 MB/s after data compression), which means about 690 GBytes per day written on disk [20].

Mainly, two other data streams are produced by some of the online processing tasks implemented: the 50 Hz resampling of the data and the trend data computation. As shown on Fig. 5, the 50 Hz resampling (Fbt50Moni, Fbt50Susp, Fbt50Det) is distributed over the three upstream frames collector and provides resampled data (after anti-aliasing filter of 7th order) to a dedicated frames collector Fbm50 where they are written on disk. This allows a fast access to several weeks of data in order to follow and study the low frequency behaviour of the interferometer. The trend data are statistics (mean, rms, max, min) computed for each channel by a dedicated process (FbtMain on Fig.5) and written on disk along with the slow

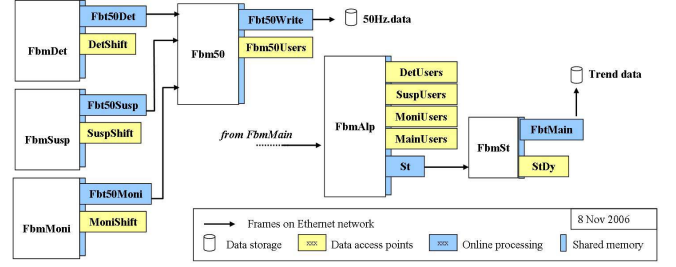


Fig. 5. Online processing tasks (blue color) and online data access points (yellow color) within the DAQ architecture, in November 2006.

monitoring data. The trend data stream allows to monitor over several months the evolution of the detector, of the controls, of the environment or of the DAQ itself.

The access to those various data streams can be done online thanks to access points (or frames providers) connected to the shared memory of one of the frames collectors. Those access points (see Fig.5) are based on the FdIOServer described in section II-C. They have no link with the DAQ except the shared memory where they read the data. They consume at most some percents of CPU and allow to connect online, through Ethernet, any tool developed in Virgo for the visualisation, monitoring or writing of the data.

IV. DAQ USAGE IN INTERFEROMETER'S CONTROLS

A. DAQ and interferometer's digital control loops

the DAQ monitors all the signals involved in the control loops. In addition, several signals, including the dark fringe signal, are acquired by readouts used at the same time for the DAQ and for the controls of the interferometer. The main control loops readouts involved also in the DAQ are the following:

- *The longitudinal global control:* use photodiodes signals read at 10 kHz to compute the correction signals that drive the mirrors longitudinal position, thus the optical cavities length.
- *The alignment global control:* use quadrant photodiodes signals read at 500 Hz to determine the beams position and to compute the correction signals that drive the mirrors angular position.
- *Each suspension local control and inertial damping:* use PSD's read at 500 Hz and camera signals read at 50 Hz to compute the correction signals that drive the suspension's position and orientation.
- *Laser frequency and input mode-cleaner length control:* use photodiodes signals read at 10 kHz to compute the correction signals that drive the input laser beam frequency and the input mode-cleaner cavity length.

B. DAQ and interferometer's lock automation

To put the interferometer on its working point, a sequence of more than hundred monitoring and manual actions is required

from operators in control room. It appeared rapidly that, knowing the signals to monitor through the DAQ and using Ethernet messages, this interferometer's locking sequence could be automated. In 2005, a software named "Alp" has been developed in Virgo for this automation. Practically, a set of Alp processes gets data from the shared memory of a dedicated DAQ frames collector (FbmMain) and, by successive steps, controls the lock of the interferometer until its working point. Those steps are numbered from 1 to 12, among which the main ones are:

- *Step 1:* Mirrors are pre-aligned (except recycling mirror), Fabry-Perot cavities are locked and the interference is locked on "gray fringe".
- *Step 4:* Recycling mirror is aligned and recycling cavity is locked. Light power on the beam splitter goes up to several hundreds of watts.
- *Step 8:* The interference is locked on dark fringe and the global control of alignment is activated.
- *Step 10:* The output mode-cleaner is locked on the laser TEM00 mode and the dark fringe control uses photodiode B1 placed after the output mode-cleaner.
- *Step 12:* Tidal control is activated as well as the re-allocation of controls on intermediate part of mirrors suspensions.

Then, reduction of control noises is activated, permanent calibration signals are injected on mirrors longitudinal controls and "Science Mode" flag is switched on.

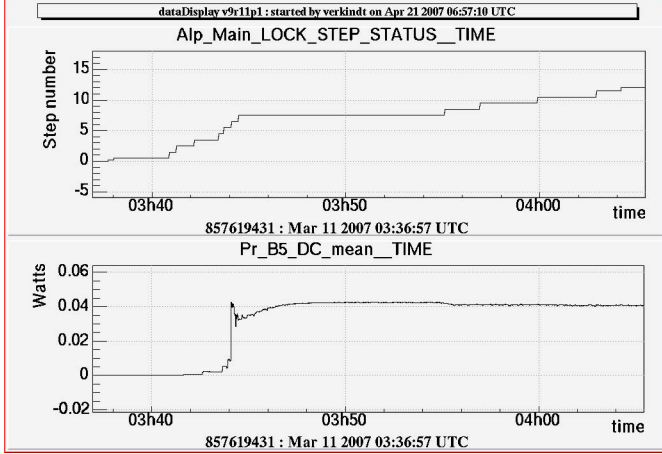


Fig. 6. A typical sequence of the automated interferometer startup procedure. Upper plot shows the evolution of the `Alp_Main_LOCK_STEP_STATUS` value that monitor the startup steps. Lower plot shows the light power on the beam splitter that increases a lot when the recycling cavity is locked.

Each step of this locking sequence is defined in the configuration of an Alp process, which contains a set of conditions on the signals provided by the DAQ and a set of actions to be done on the interferometer. Those actions are done through Ethernet by sending Cm messages [19] to the softwares that control the interferometer's sub-systems. Each step defined in the configuration can be conditioned by the result of the previous steps and the full sequence of controls can thus be done easily

and quickly. The low latency of the DAQ (about 2 s) allows the Alp automation software to have enough control speed and to complete the whole automated sequence in currently less than 15 mn (see Fig.6), if we exclude the step 8, which is currently down-limited to 20 mn in order to overcome the thermalization of the mirrors heated by the laser beam.

V. DAQ MONITORING AND PERFORMANCES

As we will see in section VI, the Virgo detector and its environment are permanently monitored, but this does not guarantee the availability and the validity of the data. At each level of the data acquisition chain (front-end, frame builders, frames collectors), a failure can be at the origin of missing or corrupted data. Thus, all the processes involved in the data acquisition or in the data storage are monitored.

Using the GUI tool Xforms [21], a graphical interface [22] has been developed to control and monitor each DAQ process. This interface allows to start and stop the processes and to change their configuration. In addition, it provides several informations like memory consumption, process id, TCP name, etc... and builds a web page showing the online status of the DAQ processes with a latency below 2 seconds. Fig.7 shows parts of the graphical interface used to monitor all the processes used in the data collection.

Collect	active	(golden) GP5 860925740 - Apr 18, 2007 (108) 12:02:07
TSensor	Golden	fr:00269 mm05350 GP5:860925740-2700- Qc 0x0000e022
Detection DAQ line		
FbmDet	Golden	fr:00268 (1.85e+03 KB) [0/4]- s.time 0.78s
FbmOP	Active	fr:00268 (1.14e+03 KB) [0/4]- lostGcAll- s.time 0.568s
FbmE	Golden	fr:00268 (672 KB) [0/4]- s.time 0.291s
FbmF	Golden	fr:00268 (972 KB) [0/4]- s.time 0.402s
FbmDet	Active	fr:00269 (18.067 KB) GP5860925740 Latency: 0.0787 - lostGc_Locking_mirror
FbmDet	golden	fr:00268 (4.67 MB) latency: 1.88 adc:495 sms:23

Fig. 7. Part of the graphical interface used to control and monitor the data collection DAQ processes. First column (colored buttons) and third column show the status of the process. Second column (with arrows) give access to the logfile of each process. Detailed information (frame number, rate, latency,...) is provided on the last column.

In addition, some slow monitoring data are created by the data acquisition itself. Those data allow to monitor for instance the correctness of the timing stamp, the efficiency of the data acquisition, the total number of channels acquired, the data rate along the DAQ chain, the latencies introduced in the data acquisition chain. Among those data, the most important ones are visualized by trend plots on the web [23].

Since January 2002, those monitoring tools have allowed to estimate the performances of the data acquisition system in terms of stability, efficiency, data rate and latency. The main results are the following:

- The mean DAQ latency has been reduced to less than 2 seconds at the level of FbmMain. This 2 seconds latency and the reliability of the DAQ has allowed to develop the automation of the interferometer's startup through the DAQ.

- The data rate permanently sustained by the DAQ is about 20 MBytes/s (4 times larger than foreseen in the DAQ design), with more than 1350 fast channels (sampling frequency above 1 Hz) recorded.
- The percentage of data loss is difficult to estimate because the number of channels acquired fluctuates according to the commissioning needs. Nevertheless, it has been estimated on the dark fringe signal (main signal that will be used for gravitational waves search). It is less than 0.1% for each commissioning run and about 0.3% over the whole period from January 2004 to November 2006. This estimation takes into account all the periods of detector's maintenance, disks problems, network failure, upgrade of machines or operating system, stops of the DAQ (for architecture's modifications or for the use of new versions of the libraries).

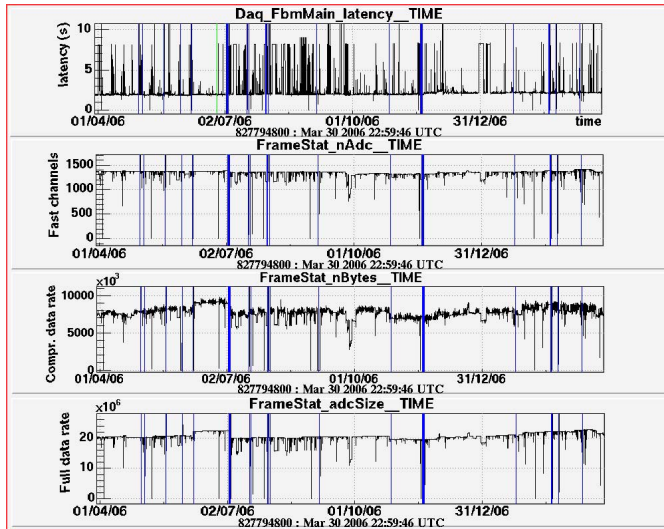


Fig. 8. From top to bottom: DAQ latency, number of fast channels and data rate (compressed and uncompressed) seen by DAQ between 31/03/2006 and 31/03/2007.

The two lower plots of Fig.8 show, over one year, the continuous increase of the data rate (compressed and uncompressed), while the two upper plots show the relative stability of the mean latency and the increase of the number of fast channels collected. Table I shows the evolution of some DAQ numbers since July 2002, where we can see the increase of readout processes, channels number and data rate, while the latency and data loss are reduced down to 2 seconds and 0.3% respectively. Table II shows the duty cycle of the data acquisition between January 2004 and September 2006 and over most of the commissioning runs. This performance is illustrated by Fig.9, which shows the integrated DAQ duty cycle over one year.

The Virgo data acquisition system has run permanently since early 2001, with the good performances described above. It sustained an increasing number of channels reaching now more than 1350 "fast" signals. It corresponds to a raw data

rate of 20 MBytes/s currently provided to control room with a mean latency of 2 seconds.

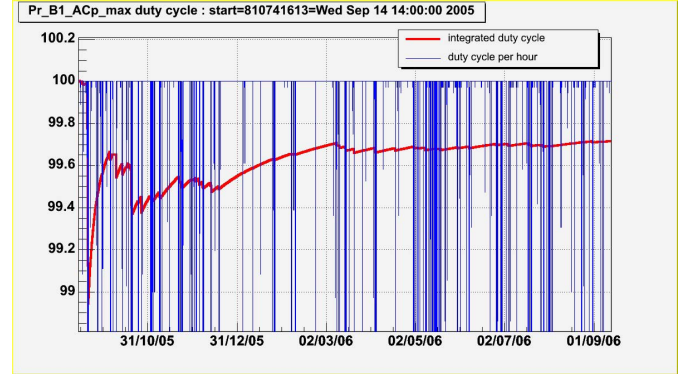


Fig. 9. DAQ duty cycle estimated by the presence of the dark fringe channel in the stored raw data, between sept. 2005 and sept. 2006.

TABLE I

EVOLUTION OF SOME PARAMETERS OF DAQ OVER THE LAST 4 YEARS. THE FULL LATENCY IS TAKEN BETWEEN FRONT-END READOUT AND DATA STORAGE (IN 2006, IT INCLUDED ABOUT 20 ADDITIONAL SECONDS DUE TO QUALIFICATION OF THE H RECONSTRUCTION PROCESS). THE ONLINE LATENCY IS TAKEN BETWEEN FRONT-END READOUT AND THE LAST FRAMES COLLECTOR (FBMMAIN) WHERE DATA ARE READ BY THE AUTOMATION PROCESSES. THE PERCENTAGE OF DATA LOST IS THE PERCENTAGE OF TIME WHERE THE DARK FRINGE SIGNAL WAS ABSENT.

Date	Jul2002	Jul2003	Feb2004	Dec2004	Aug2005	Nov2006
Run (duration)	E4 (72h)	C0 (28h)	C2 (72h)	C5 (120h)	C6 (336h)	WSR5 (72h)
Fast raw data channels	690	790	1180	1340	1330	1385
Trend data channels	3260	4000	5670	7880	7450	9473
Compr. data rate (MB/s)	4.2	4.7	5.8	6.7	6.3	7.9
Front-end readouts	48	—	76	109	94	102
Frame builders	22	—	30	30	31	34
Frames collectors	4	4	5	7	8	11
Data storage (TB)	2	6	32	70	120	120
Full latency (s)	8	8	7	6	4	22.7
Online latency (s)	8	8	6	5	3	1.9
Data lost percentage	—	—	—	0.18%	0.24%	0.023%
Data streams	2	3	4	6	6	6

VI. ONLINE DETECTOR MONITORING

Virgo must be operated 24h per day while very exposed to instrumental and environmental noises because of its high sensitivity. This constraint requires a highly selective data analysis and a reliable data acquisition. But it requires also a permanent monitoring of the interferometer's running conditions, first to provide in control room a quickly updated information on the detector's behaviour, then to help in the selection of data segments where data analysis can be done with confidence. Virgo has developed since several years some software tools for the online monitoring of the detector. Most of those tools are presented here. They use often the software libraries created for the DAQ and, thus, benefit from their reliability.

TABLE II

ESTIMATION OF THE DAQ DUTY CYCLE BETWEEN JANUARY 2004 AND SEPTEMBER 2006 FOR THE TREND DATA STREAM AND THE RAW DATA STREAM (DARK FRINGE SIGNAL ONLY). ALSO SHOWN IS THE DAQ DUTY CYCLE FOR EACH COMMISSIONING RUN SINCE JANUARY 2004.

Data stream	Epoch	Start GPS	duration	Duty cycle
Trend data	Jan2004-Jan2005	757585800	31400000	96.509%
Trend data	Sep2005-Sep2006	810741613	31400000	97.770%
Raw data	Jan2004-Jan2005	757585800	31400000	99.997%
Raw data	Sep2005-Sep2006	810741613	31400000	99.716%
Raw data	C5 (02 Dec 2004)	786031360	436000	99.828%
Raw data	C6 (28 Jul 2005)	806602213	1296000	99.760%
Raw data	C7 (14 Sep 2005)	810741613	403200	99.987%
Raw data	WSR1 (08 Sep 2006)	841784413	201600	100.000%
Raw data	WSR2 (23 Sep 2006)	843001214	201600	99.987%
Raw data	WSR5 (10 Nov 2006)	847231214	201600	99.977%
Raw data	WSR6 (01 Dec 2006)	849045614	201600	99.995%
Raw data	WSR7 (12 Jan 2007)	852678014	201600	99.940%
Raw data	WSR8 (9 Feb 2007)	855093614	201600	99.976%

A. The data display

A first mandatory need of the Virgo commissioning was to monitor online from the control room a large number of signals provided by the interferometer. To this purpose, a software tool dedicated to the visualization of the data has been developed for the Virgo experiment: the dataDisplay [24]. It allows, through a "buttons and browsers" graphical interface, to read, online or offline, the frame formatted data produced in Virgo. Fig.10 shows one of the dataDisplay's graphical interface panels.

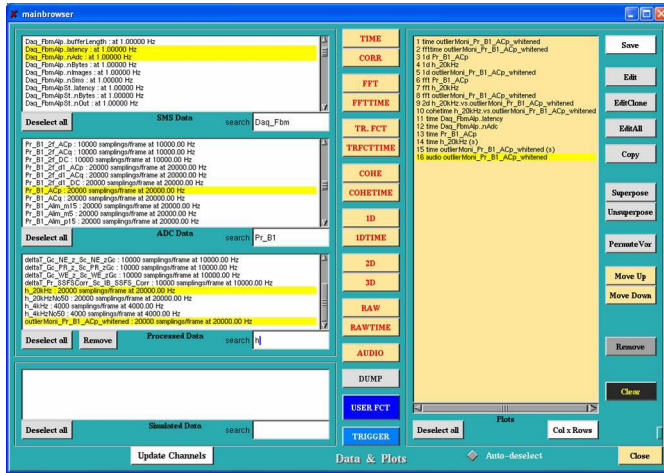


Fig. 10. Graphical panel to manage the signals and the plots of the dataDisplay. It allows to visualize the signals available in each frame, to choose some of them and the type of plots to display, then to manage the superposition of the plots or to edit the parameters of each of them.

Over the last years, the dataDisplay has enriched with several functionalities and new types of plots. It is able to create and edit plots that could help for the monitoring of the detector (time plots, spectra, 1D or 2D distributions, beams imaging...) or the signals analysis (transfer function, coherence plot, spectrograms...). The dataDisplay can also do operations on

the signals in order to monitor some combinations of signals used in the controls. It can superpose plots (including plots of the signals taken at different times), do operations on the plots, view the content of the frames or listen to the data. Fig.11 shows an example of online data visualization, during the WSR1 run in september 2006.

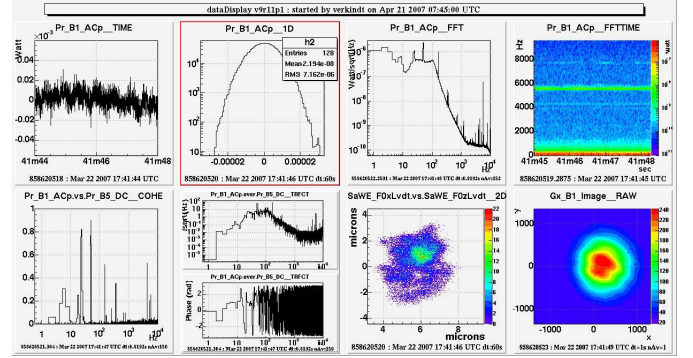


Fig. 11. Examples of plots created online by the dataDisplay with the data received from the DAQ. On first row are visible, from left to right, the dark fringe signal versus time, its distribution, its frequency spectrum and its time-frequency spectrogram. On second row are shown the coherence and the transfer function (module and phase) between the dark fringe signal and the light power on beam splitter. Last two plots monitor the horizontal position of the upper part of west mirror suspension and the profile of the beam at the output of the interferometer.

The dataDisplay uses open source code: a graphical interface created with the Xforms library [21], a data transfers management based on the frame library [16], the Fd and Cm libraries, and a plots visualization based on the ROOT libraries developed at CERN [25]. It has been compiled and used under OSF1 v5, Mac OSX, SunOS, Linux RedHat 7.2, Linux RedHat 9 or Scientific Linux 4.2.

The dataDisplay has been widely used in the Virgo control room to monitor online the detector. It has evolved over several years, according to the needs of the Virgo commissioning, and is still improving, focalizing now on the data analysis needs with new data selection, trigger and signals processing functionalities.

B. Monitoring through the web

In parallel to the online visualization provided by the dataDisplay, a set of web pages has been developed to provide over a longer time scale (some hours), but with a larger latency (half an hour), an overview of the state of the interferometer [23]. Those web pages are generated thanks to the "trend data" stream and thanks to a software environment developed for Virgo data analysis [26], VEGA, which mainly adapts to the Virgo needs the ROOT libraries developed at CERN. Thanks to the C/C++ interpreter of ROOT, a set of macros has been developed to monitor the long term evolution of the detector's subsystems (mirrors alignment, light power inside the recycling cavity, current sensitivity, DAQ data rate, etc...). Such macros are also used now to monitor the results

of glitches search algorithms, to follow the amplitude and frequency of spectral lines, to follow the evolution of the parameters used in the calibration, the level of noise in various frequency bands, the spectrograms of several useful signals, etc...

C. Online data qualification

In addition to the data visualization through dataDisplay or web monitoring, a mandatory need of the Virgo experiment was to set discriminant quantities (quality flags) that summarize the state of the detector. An architecture that uses the DAQ tools has been setup to generate those quality flags, record them in the Virgo data stream and visualize them in control room.

For each Virgo sub-system (suspensions, photodiodes, laser injection, environment monitoring, etc...), a set of quality flags is produced online by a dedicated algorithm. Each algorithm is made of a set of conditions applied on signals. From this set of flags a global quality flag is created. Then, all the flags are displayed online through web pages [27] to inform control room operators about any problem detected in the interferometer or its environment. In parallel, all the flags are also sent to the DAQ and stored on disk to help in the selection of data segments where the interferometer is in good conditions for data analysis.

Technically, all the detector monitoring algorithms are connected to the shared memory of a specific frames collector and use the same software implementation, the same libraries and the same type of configuration syntax. This is done thanks to a library (MoniL) developed to generate the algorithms and manage the quality flags through a configuration file, where the qualification of the data can be modulated according to the steps of the interferometer's startup procedure.

VII. CONCLUSION

Since summer 2001, the data acquisition of Virgo has run almost continuously, with regular improvements but without changing the main architecture, the software libraries or the standard tools chosen (VME, Ethernet, optical links, LynxOS, Linux, shared memory...). It has fulfilled its requirements for data loss minimization, latency reduction or data rate management. The software tools developed for the data collection have provided a good flexibility that has allowed for instance to connect easily new online processings or online monitoring tools.

Research and development is currently done to improve the Virgo detector in the coming years. This improved detector will have faster control loops with reduced noise levels. In this perspective, an upgrade of the VME boards used for the timing distribution and for the signals optical propagation is currently under way [28]. This new "front-end" acquisition will offer more possibilities and will handle the faster control

loops, at least doubling the data rate to collect. However, thanks to the choice we made of standard tools like Ethernet network and shared memory, no new heavy development is foreseen for data collection or online processing which may adapt (using faster and more numerous Linux workstations) to the new data rate and to possible new online processing requirements.

REFERENCES

- [1] *The Virgo Collaboration Final Design Report*, 1997, Virgo technical note VIR-TRE-DIR-1000-13
- [2] *The status of Virgo detector*, F. Acernese et al., Proceedings of GW-DAW11, Postdam (18-21 Dec. 2006).
- [3] *Measurement of the VIRGO superattenuator performance for seismic noise suppression*, G. Ballardin et al., Rev. Sci. Instrum., vol. 72, no. 9 (2001)
Measurements of the seismic attenuation performance of the Virgo superattenuator, S. Braccini et al., Astro. Part. Physics, 23 (2005) 557-565
- [4] *Data Acquisition and Online Processing for the VIRGO experiment*, Proceedings of IXth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, Roma (2-8 July 2000)
- [5] *Virgo Data Acquisition*, F. Acernese et al., Proceedings of the IEEE NPSS Real Time conference, Montreal, May 2003.
See also <http://lapp.in2p3.fr/virgo/daqManual/VirgoDAQ-RT2003.pdf>
- [6] *Length Sensing and control in Virgo Gravitational Wave Interferometer*, F. Acernese et al., IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 55, 6 (2006) p.1985-1993
- [7] *The real-time distributed control of the Virgo Interferometric Detector of Gravitational Waves*, F. Acernese et al., Proceedings of the IEEE NPSS Real Time Conference, Chicago, Mai 2007
- [8] *RIO 8062: PowerPC based RISC I/O boards*, (400 MHz, 32 or 64 MBytes RAM), DOC 8062 UM CES, 1998, Creative Electronics Systems S.A., 38 av. Eugène-Lance PO Box 584 CH-1212 Grand-Lancy 1, Switzerland
- [9] *The Virgo Timing system*, Virgo note VIR-TRE-LAP-5200-103, 1997
- [10] *The Digital Optical Link boards*, Virgo note VIR-SPE-LAPP-5200-105, 2000
- [11] *New DSP Final Design Document*, A. Gennai, Virgo note VIR-SPE-PIS-4900-120, 2004
- [12] *The Digital Camera VME readout*, F. Bellachia et al., Nucl. Instrum. Methods A 413 (1998) 151
- [13] B. Abbott et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 517 (2004) 154
See also <http://www.ligo.caltech.edu>
- [14] *Timing performances*, Internal notes LIGO-T020036-00-D and VIR-NOT-LAP-1390-198, 2002
- [15] *Frame format specifications*, Internal notes LIGO-T970130-F-E and VIR-SPE-LAP-5400-102
See also <http://lapp.in2p3.fr/virgo/FrameL>
- [16] *Frame Library*, Virgo note VIR-MAN-LAP-5400-103, 1997
See also <http://lapp.in2p3.fr/virgo/FrameL>
- [17] *Frames distribution on Ethernet*, Virgo note VIR-SPE-LAP-5400-105, 2004
- [18] *Frame distribution through shared memory*, Virgo note VIR-MAN-LAP-5400-113, 2000
- [19] *The Cm library*, Virgo note VIR-MAN-LAL-5100-112, 1998
- [20] *Offline storage system*, Virgo note VIR-TRE-CAS-7100-103, 2000
- [21] *The Xforms Graphical User Interface library*, T.C. Zhao, A. Leeming <http://savannah.nongnu.org/projects/xforms>
- [22] *CI Graphical Interface*, Virgo note VIR-MAN-LAP-5400-119
- [23] See <http://www.casina.virgo.infn.it/MonitoringWeb/General>
- [24] *Data Display*, Virgo note VIR-SPE-LAP-5400-108, 2004.
See also <http://lapp.in2p3.fr/virgo/dataDisplay>
- [25] *ROOT libraries, for data handling and visualization*, <http://root.cern.ch>
- [26] *Vega, an environment for gravitational waves data analysis*, Int. Journal of Modern Physics D9 Issue 3 (2000) 293
- [27] See <http://olserver13.virgo.infn.it/it/qcmoni/V5/index.php>
- [28] *Control System Upgrade of the VIRGO interferometer. Timing Interface & Optical Links*, Virgo Note VIR-NOT-LAP-1390-278

Annexe D

Search for non-Gaussian events in the data of the VIRGO E4 engineering run

Cette annexe reproduit le résumé de ma présentation à la conférence GWDAW8 sur l'étude des signaux transitoires dans les données du run E4 de Virgo.

Paru sous la référence :

Search for non-Gaussian events in the data of the VIRGO E4 engineering run, F. Acernese et al (Virgo Coll.), Classical and Quantum Gravity 20 (2003) 623-632
Proceedings of GWDAW8, Kyoto, Japan (Dec 2002).

Search for non-gaussian events in the data of Virgo E4 engineering run

The VIRGO Collaboration[†] (presented by Didier Verkindt[‡])

[†] Traversa H di via Macerata, 56021 San Stefano a Macerata, Cascina (Pisa), Italy.

[‡] LAPP, Chemin de Bellevue, 74941 Annecy-le-Vieux

E-mail: verkindt@lapp.in2p3.fr

Abstract. This work is a first attempt to search for glitch events in the data of the Virgo Central Interferometer (CITE). In a first step, using simple algorithms, we have searched for strong glitches in the interferometer's output photodiodes signals, over the 3 days of data of the last engineering run. In a second step, we have focused on 10 hours of data while the interferometer was locked and stable. The events found in the dark fringe signal during this period are all within 3 rms around the mean output value of each algorithm and are, in some cases, linked to a beat between the powerline 50Hz contamination and a 43.7Hz line that comes from the injection system components. The main conclusions are that, at this level of analysis, the algorithms used have found no strong glitch-like events in the dark fringe signal of Virgo and that removing spectral lines like the 50Hz is essential to investigate further.

Submitted to: *Class. Quantum Grav.*

1. Introduction

VIRGO is a long baseline interferometer aimed at the detection of gravitational waves. During the years 2001 and 2002, a preliminary version of the VIRGO interferometer [1], with arms of 6 meters long and called CITF (Central InTerFerometer), has been commissioned [2, 3]. During this commissioning a search for glitches has been prepared in order to find events that should be vetoed in the futur and in order to exercise detector monitoring software tools.

From september 2001 to july 2002, several commissioning engineering runs have been undertaken. Each time, a search for glitches was performed on the data recorded. Run E4 was the last run and lasted 3 days, from 12th to 15th of July 2002. During E4, most of the components and most of the control loops of the future 3 km Virgo detector were active. About 1 TBytes of data were recorded and, before the finalization of the Virgo online monitoring, we performed an off-line search for glitches, mainly in the photodiodes channels. The aim was to find detector noises that could be removed by hardware or software modifications and to have a first look at the detector's fake signals that could prevent a search for astrophysical events.

We present here the first results obtained: some examples of strong glitches found and a study of the dark fringe signal during a stable period of 10 hours. More detailed results of this analysis are presented in a Virgo note [4].

2. Algorithms used

Two algorithms were used for this search of glitches. Both work in the time domain and are derived from one algorithm developed for the Virgo online monitoring [5]. The first one (algo1) take as input the signal itself, the second one (algo2) includes a differentiation step (simplest high-pass filter) and works then on the signal derivative.

Each algorithm uses a running mean and a running rms of the signal, which are computed using a sliding window and an exponentially decreasing weight $w = \exp(-1/\tau)$, where τ is expressed in number of samples. In order for the algorithms to be quite sensitive to local variations without being too much non-linear, we have used $\tau = 40$ *samples* (corresponding to a time window of 2 ms for a signal sampled at 20 kHz).

If m_i and r_i are the running mean and running rms computed on the quantity x_i which is the photodiode's signal (input of algo1) or its derivative (input of algo2), the output s_i of the algorithm is defined by:

$$s_i = (x_i - m_i)/r_i \quad \text{with} \quad m_i = \frac{1}{N} \sum_j x_j w^{i-j} \quad \text{and} \quad r_i = \left(\frac{1}{N} \sum_j x_j^2 w^{i-j} - m_i^2 \right)^{1/2}$$

where N is the sum of the weights ($N = \sum_j w^{i-j}$). The algorithm triggers if $|s_i|$ is greater than a user defined threshold.

In order to get meaningful results, before passing the data to both algorithms we check

that the interferometer is locked on dark fringe and that the output mode-cleaner is locked on TEM00 mode.

Both algorithms were used offline, with the help of the GAI online monitoring tool [6] or using a macro written in C, in the Vega environment [7]. One example of glitch found by the two algorithms is shown on figure 1.

Even with the chosen parameter $\tau = 40$ *samples*, the non-linearity of the algorithms (due to the running mean and rms), prevent to express the thresholds as a number of standard deviations above a mean. Such thresholds are compared to the number of running rms above the running mean. So, the choice of the thresholds was based on the known strong glitches observed (like the one of figure 2) instead of statistical considerations.

3. Examples of loudest glitches seen in photodiodes signals

Some large glitches were found by the algorithms in run E4, when using a high threshold (threshold=6 for algo1, threshold=10 for algo2). The algorithms were used on the dark fringe signal before the output mode cleaner (B1p), on the dark fringe signal after the output mode cleaner (B1) and on the recycled power signal (B5). For each type of glitch, we tried to identify the source and, when it was needed, hardware or software modifications were decided to correct or eliminate this source. The full classification of the loudest glitches found in E4 and in previous runs is available in [4].

Events related to the electronics:

In the engineering runs before E4, the algorithms found electronics glitches that were linked to ADC problems. Hardware modifications were done to eliminate such problems. Then, during E4, the algorithms still found small glitches in the B1p signals, a few ADC counts high and one sample long, that can be related to the photodiode's digital electronics (see figure 1).

Events related to alignment or calibration procedures:

Other glitches have been related to remote actions on the components of the interferometer. One example is shown on figure 2. We have found large oscillations simultaneously on all B1 channels. The frequency of these oscillations is around 1800Hz, they are about 50 ms long and there are several of them over a few seconds. It turned out that these glitches are all simultaneous to a realignment of the detection bench telescope. This alignment is performed with motors acting on the mirrors of the telescope (picomotors activated at a frequency of 1800 Hz).

Events related to human actions:

Other types of human actions are at the origin of some events detected. One example is the switch between dark fringe signals (B1p or B1) used to lock the interferometer (see figure 3). During E4, first lock on dark fringe was acquired using B1p, then the output

Mode Cleaner was locked and B1 was used for locking instead of B1p. Since there are more modes in B1p than in B1 and since electronics gains for B1 and B1p photodiodes are not identical, the level is not necessarily the same at the output of B1 and B1p photodiodes. This results in a glitch on dark fringe correction signal and a change of level on B1 and B1p signals, at the time the switch was done. About 10 such glitches characterized by a rapid change of level on B1 and B1p dark fringe signals have been observed during E4. In the future, the situation will be improved by setting a smoother switch between B1 and B1p.

If only stable periods of E4 are analysed, which means when the interferometer is fully locked on B1 and there is no alignment, calibration, or human activity in the central building, the only glitches found are the small glitches found on B1p and related to the electronics.

4. Study of the dark fringe signal over a stable period of 10 hours

We choose to focus on a stable period of the interferometer: 10 hours from GPS=710551143 (Fri Jul 12 23:19:03 2002 UTC) to GPS=710558743 (Fri Jul 13 09:19:03 2002 UTC) and to focus on the demodulated photodiode dark fringe signal after the output mode-cleaner (B1_ACq channel).

First, in order to exclude any data containing glitches from picomotors activation, we checked that picomotors are not active. This excludes 218 seconds from the 36000 seconds of data analysed. On the remaining data, we looked at the signal distribution and we used the algorithms.

4.1. Tails of the B1_ACq distribution

Looking straightforwardly at the evolution of the signal B1_ACq distribution, we obtained the figure 4 that shows the time evolution of the B1_ACq signal distribution and the B1_ACq signal derivative distribution, for the 10 hours data set. In those two plots, each vertical colored line represents the signal distribution over 10 seconds (200000 samplings). It allows to follow the evolution of the signal distribution and to see where the tails are built. In those plots, two parts can be isolated:

- During about 30 seconds, from GPS=710556730 to GPS=710556790, an action made on the input Mode-Cleaner created a high amplitude 36 Hz noise on all the photodiodes channels. This can be seen on the plots of figure 4 around the value 5600 as large tails generated in the signal distribution. We will see in section 4.4 that this noise, even if not of glitch type, was "detected" by the "glitch search" algorithms.
- The last 3000 seconds contain noisier data. This is a consequence of the closing of the angular alignment loop of the input mode cleaner, at GPS=710584258. We

will see in section 4.2 that the algorithm algo2 was sensitive to this noise increase in the derivative of the input signal.

4.2. Search for glitch events in the dark fringe signal

Looking at the data with the algorithms, we have found in the B1_ACq signal 8 events above a threshold of 3.5 for algo1 and 30 events above a threshold of 5.5 for algo2 (from which 17 events are in the noisier last hour of the data set). The two algorithms have their events at different times because algo1 is sensitive to the changes of the signal and algo2 is sensitive to the changes of the derivative of the signal. For large glitches (see section 3), their answers are similar. Figure 5 shows, for each algorithm, the largest event found in the 10 hours of data.

The origin of the largest event seen by algo1 is a beat phenomenon between the 50Hz contamination and a 43.7Hz line that is coherent with the input Mode Cleaner angular correction signal, that provides a "quiet zone" of data every 0.2 second (see figure 7). In such a "quiet zone", the running rms computed by algo1 is reduced and the algorithm gives then a high output at the exit of the zone (the "event" detected is at sample 14755 on upper plot of figure 5).

As can be seen on lower plot of figure 5, at this level of analysis, there is no indication that the events found by algo2 have a physical source (it may be just statistical fluctuation in the B1_ACq dark fringe signal). Using the derivative of the signal protects relatively this algorithm from the 43.7Hz-50Hz beat phenomenon seen by algo1.

Figure 6 shows the maximum per second of the output of each algorithm versus the GPS time. Except for the presence of noisier data in the last hour, no structure in time is visible at the output of the two algorithms, over the 10 hours of data analysed.

4.3. Down-sampling of the B1_ACq signal

For both algorithms, a down-sampling of the data at 2kHz has also been performed in order to look at larger time scale glitches in B1_ACq. Running the algorithms on the down-sampled data, we have found 31 events above a threshold of 3.5 for algo1 (from which 18 events are in the noisier last hour of data) and 24 events above a threshold of 4 for algo2 (from which 7 events are in the noisier last hour of data).

Figure 8 shows the strongest events found by each algorithm, after down-sampling at 2 kHz, in the 10 hours of data. The beat between the 43.7Hz and 50Hz lines or some statistical fluctuations are, once again, at the origin of those events.

4.4. The 36 Hz noise at GPS=710556730

Figure 9 shows, in a time and a time-frequency plots, the 30 seconds of data from GPS=710556730 to GPS=710556790, where a 36Hz noise appeared after acting on the alignment control of the input mode cleaner. Figure 10 is a zoom of figure 6 showing that, during these 30 seconds, the output of both algorithms are minimal (because the

low frequency 36Hz signal saturates any other fluctuations of B1_ACq and the running mean follows well the 36 Hz sinusoide). The algorithms are sensitive to spectrum changes like dominant peaks appearing in the spectrum and they have "detected" the 36Hz noise by a decrease of their output over the 30 seconds noise duration.

5. Conclusions

Strong glitches have been found in photodiodes signals, during the Virgo CITF engineering runs, and most of them were due to human actions on the interferometer. Most of the loudest glitches due to photodiode electronics were removed by a recabling of the ADC boards. A softer switch between B1p and B1 photodiodes used for dark fringe loop will be implemented. Full automatic alignment will reduce in the futur the number of manual alignments (use of picomotors) while the interferometer is locked.

In the E4 run data, a 10 hours clean and stable period (interferometer locked, output Mode Cleaner locked and no manual alignment performed) was analysed and no strong glitch was found by our algorithms in the dark fringe signal after the output Mode Cleaner. Some of the largest events found were due to a beat between the 50Hz power line contamination and a 43.7Hz line that comes from one of the injection system components.

Down-sampling of the data has been used to detect some events at longer time-scale. In the present state of the analysis, the events found can be associated with statistical fluctuations or, once again, with the beat between 50Hz and 43.7Hz lines.

At this level of analysis, no strong "glitch-like" event has been seen in the dark fringe signal of Virgo's CITF. Removing the powerline 50Hz contamination (and other low frequency noises like the 43.7Hz line) from the dark fringe signal is essential to investigate further.

6. References

- [1] *Virgo Status*
"Status of Virgo", Virgo Collaboration (presented by A. Vicere), GWDAAW 2002 proceedings.
- [2] *Commissioning of the Central Interferometer of the Gravitational Waves Interferometer Virgo.*
Virgo Collaboration, to be published in Classical and Quantum Gravity.
- [3] *Central Interferometer Commissioning. Final Report*
M. Barsuglia, F. Bondu, R. Flaminio, P. La Penna, G. Losurdo, E. Majorana;
Virgo Note VIR-NOT-LAP-1390-224, 15 Oct. 2002
See also <http://www.virgo.infn.it>
- [4] *Search for glitches events in E2, E3 and E4 runs*
E. Tournefier, D. Verkindt; Virgo Note VIR-NOT-LAP-1390-230, 15 Jan. 2003
See also <http://www.virgo.infn.it> or <http://wwwlapp.in2p3.fr/virgo>
- [5] *Detector Monitoring Algorithms in the General Algorithm Interface tool (GAI).*
A. Kaczmarek; Virgo Note VIR-MAN-LAP-5400-118
- [6] *General Algorithm Interface (GAI). Software tool for online monitoring.*
D. Verkindt; VIR-MAN-LAP-5400-117.
See also documentation at <http://wwwlapp.in2p3.fr/virgo/gai>
- [7] *Vega, Visual Environment for Gravitational waves data Analysis.*
D. Buskulic, International Journal of Modern Physics D, Vol. 9, 3 (2000) p.293
A software environment based on Root.
See also documentation at <http://wwwlapp.in2p3.fr/virgo/vega>

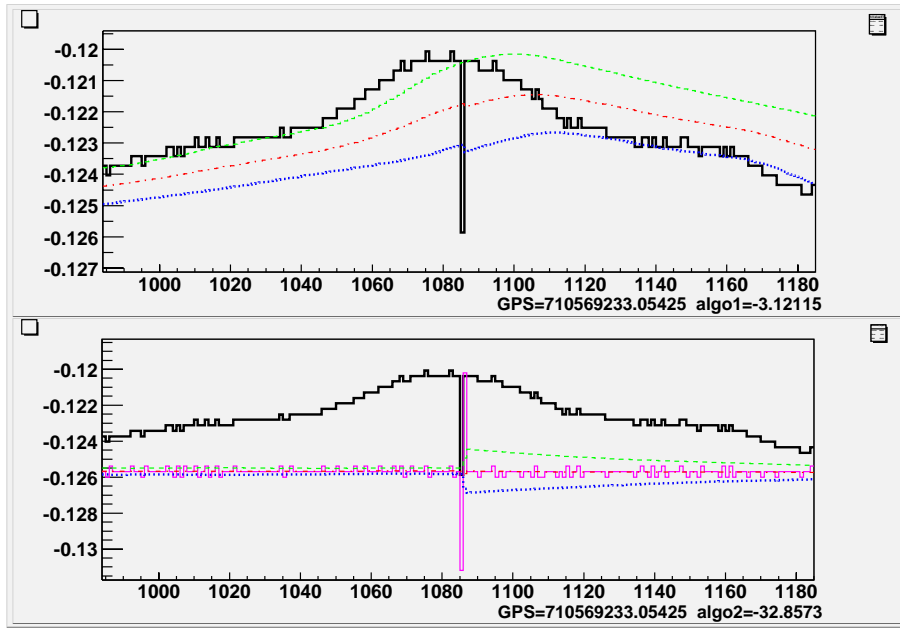


Figure 1. Example of glitch seen by the algorithms. The lower figure shows an event found by algo2 (a glitch seen only on the B1p_ACq dark fringe signal, at GPS=710569233.05, that may be due to a problem in photodiode numerization electronics): the pink thin, red semi-dashed, blue dotted and green dashed lines are respectively the algo2 x_i , m_i , $m_i - r_i$ and $m_i + r_i$ values. The upper figure shows the same event seen by algo1: the red semi-dashed, blue dotted and green dashed lines are respectively the algo1 m_i , $m_i - r_i$ and $m_i + r_i$ values. Vertical axis is in arbitrary units.

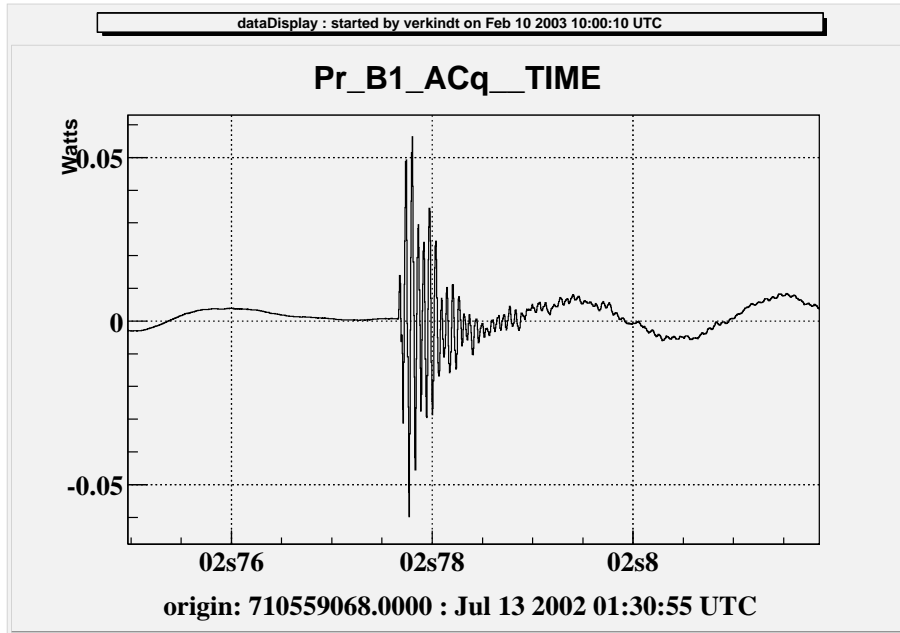


Figure 2. Example of glitch seen on the dark fringe signal and correlated with the manual alignment of the interferometer (use of picomotors). Horizontal axis is time in seconds (0s8 mean 0.8 second).

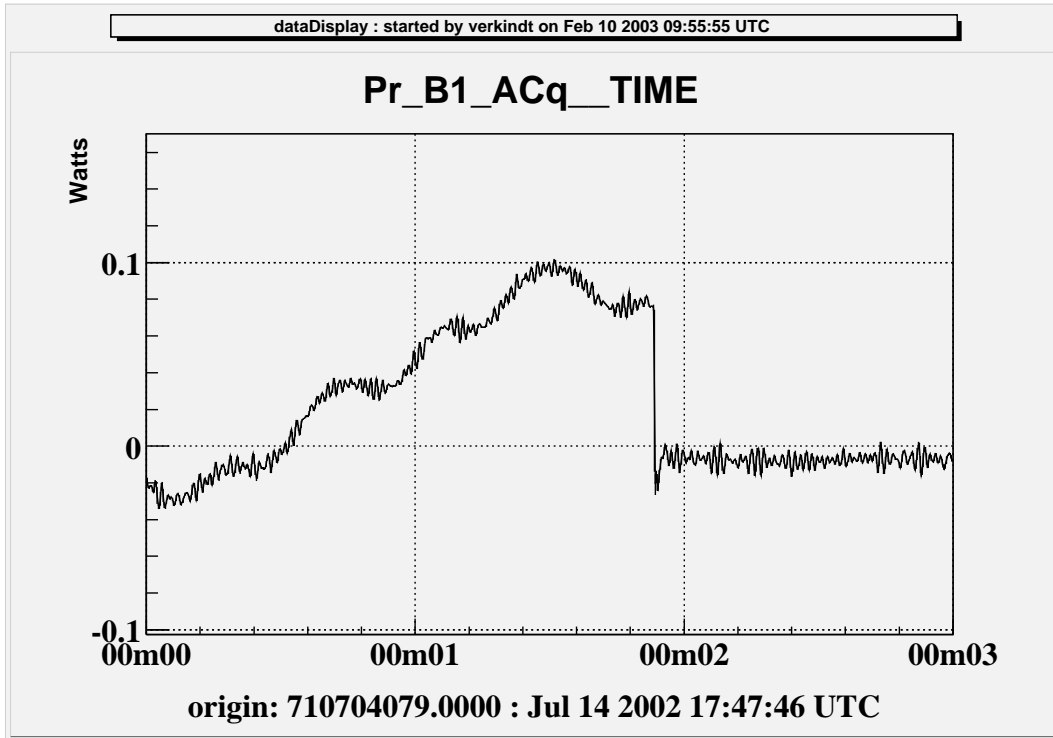


Figure 3. Example of glitch seen on the dark fringe signal and correlated with a human action: the switch between the dark fringe signals B1p and B1 used to lock the interferometer. Horizontal axis is time in minutes and seconds (0m40 mean 0 minutes and 40 seconds).

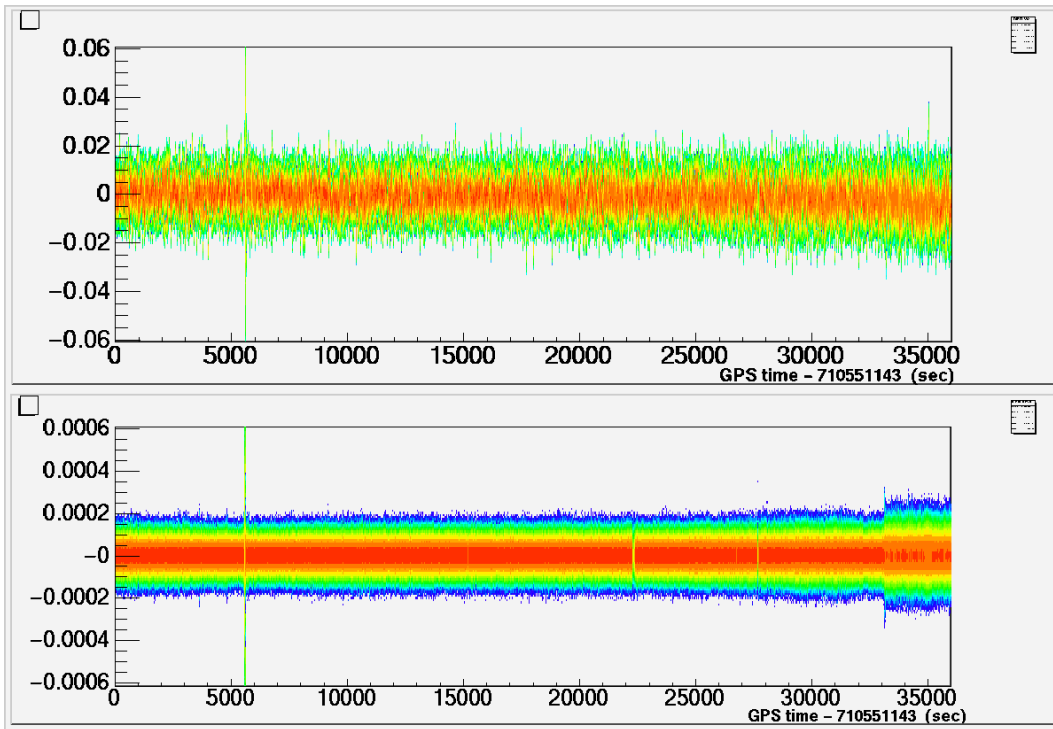


Figure 4. Time evolution of the dark fringe signal distribution (upper plot) and of its derivative (lower plot). Each vertical line contains the distribution of the signal over 10 seconds of data (200000 samples). Vertical axis is in arbitrary units. The color scale does not matter since we are interested in just looking at the extension on the vertical axis with time.

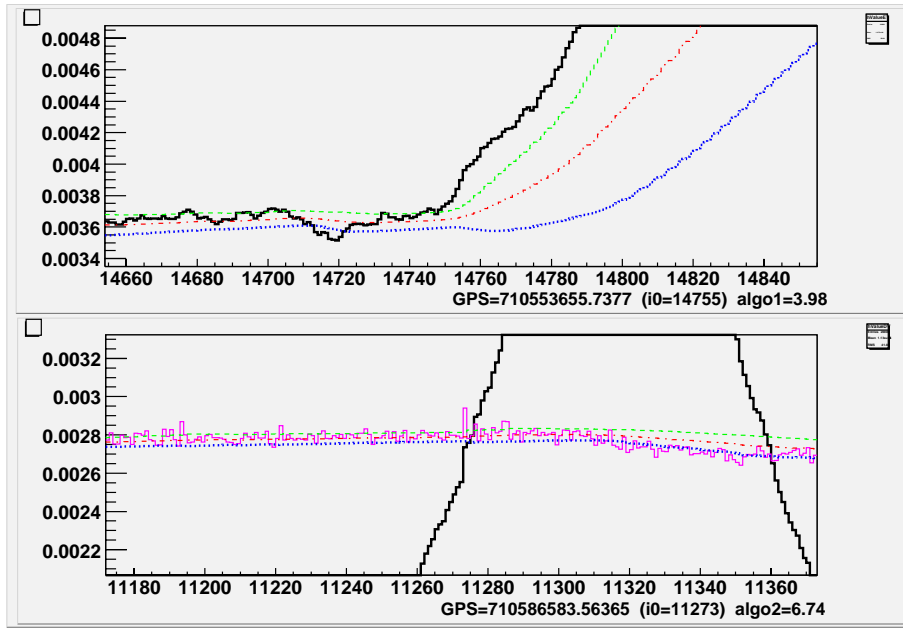


Figure 5. The largest events seen by algo1 and algo2 in the 10 hours of data. [algo1 maximum: 3.98 at GPS=710553655.7377] [algo2 maximum: 6.74 at GPS=710586583.5636]. Colored lines have the same meaning as in figure 1. On upper plot algo1 has triggered on sample 14755, while exiting of a quiet zone of a beat phenomenon. On lower plot algo2 has triggered on sample 11273, which seems to be just a statistical fluctuation of the signal's derivative. Vertical axis is in arbitrary units.

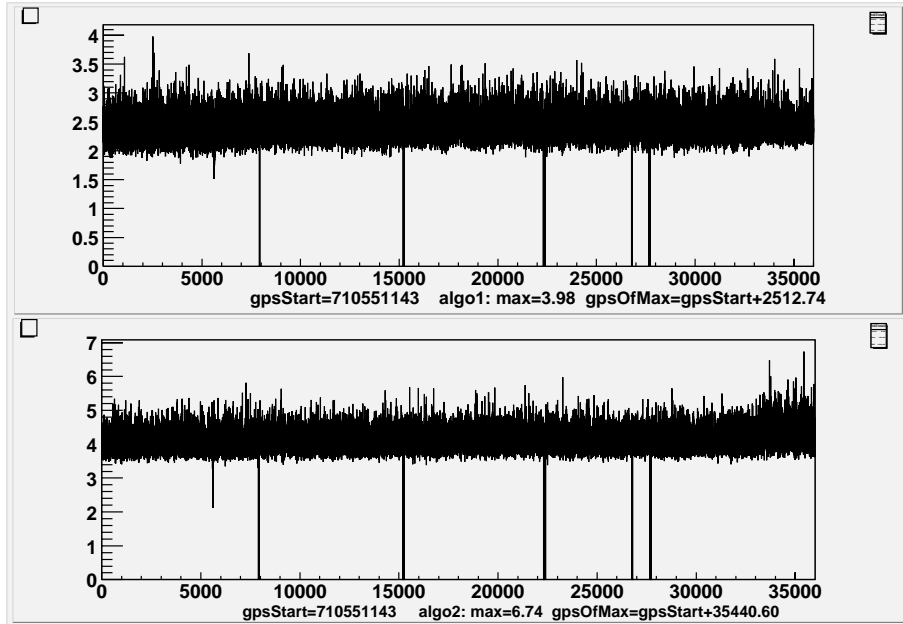


Figure 6. The maximum per second of the algorithm's output absolute value versus GPS time. Upper plot is for algo1 and lower plot is for algo2. Vertical line falling to zero are the part of data vetoed when manual alignments were performed on the interferometer (picomotors active). Largest events are located in the last hour of the data set for algo2 and in the first two hours of the data set for algo1. Vertical axis is in arbitrary units.

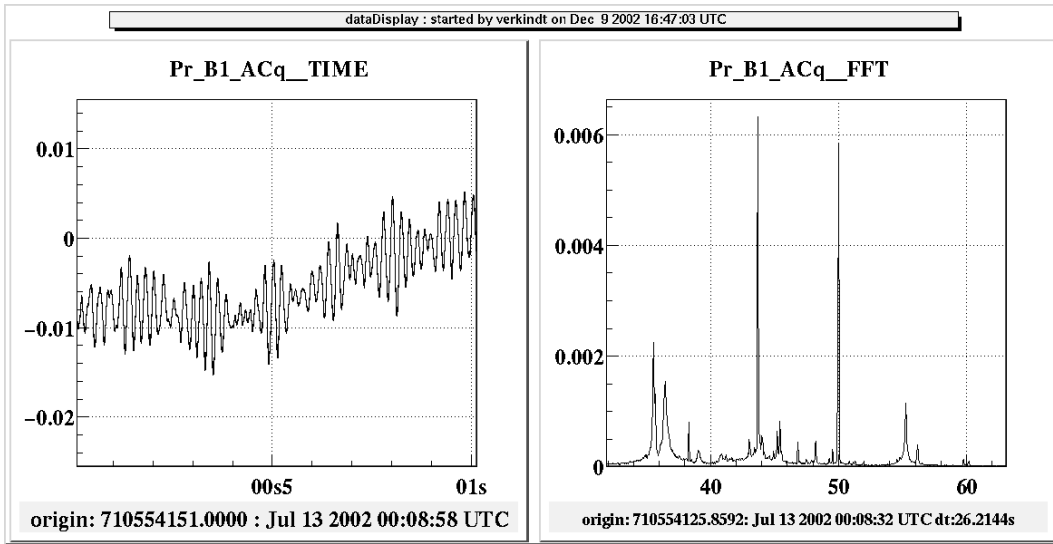


Figure 7. Time plot and spectrum plot of the dark fringe signal showing the beat phenomenon and the lines at 43.7Hz and 50Hz. Vertical axis is in arbitrary units. Horizontal axis is time in seconds (0s8 mean 0.8 second).

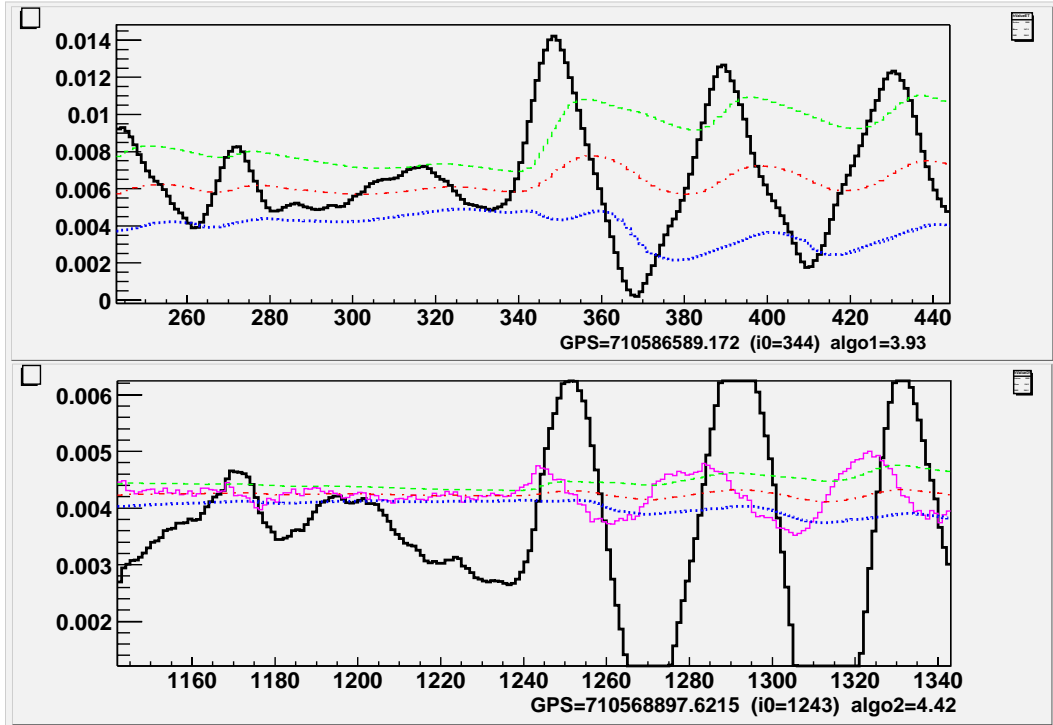


Figure 8. The largest events seen by algo1 and algo2, when data are down-sampled at 2kHz. [algo1 maximum: 3.93 at GPS=710586589.1720] [algo2 maximum: 4.42 at GPS=710568897.6215]. Colored lines have the same meaning as in figure 1. On upper plot, maximum of algo1 output is for sample 344. On lower plot, maximum of algo2 output is for sample 1243. Vertical axis is in arbitrary units.

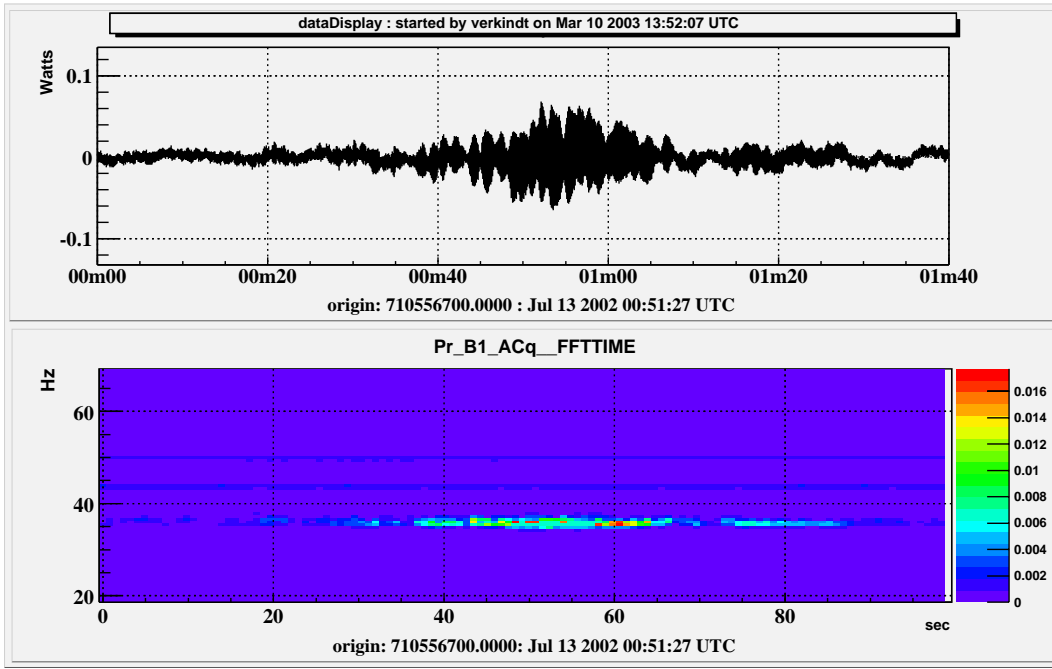


Figure 9. The 30 seconds of data with the 36Hz noise, generating the main tail in the dark fringe signal distribution. Upper plot shows the B1 signals versus time. Its horizontal axis is time in minutes and seconds (0m40 mean 0 minutes and 40 seconds). Lower plot is the corresponding time-frequency plot. Its color scale is spectra amplitude in arbitrary units.

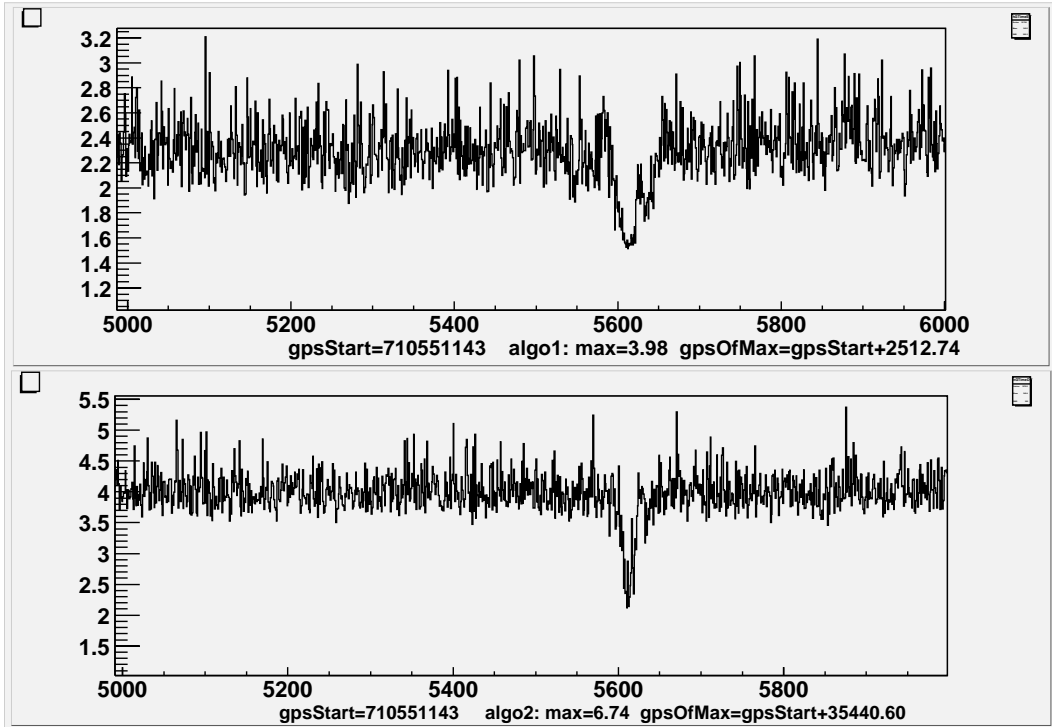


Figure 10. This is a zoom of the plots of figure 6. The 30 seconds of data with the 36Hz noise are seen by the two algorithms as a minimum of their output. Upper plot is for algo1, lower plot is for algo2. Vertical axis is in arbitrary units.

...

"Tous les Hommes recherchent l'amour. Rares sont ceux qui aiment chercher la vérité. La recherche scientifique est une quête incessante de la vérité, une question permanente sur la réalité du monde. Puisse-t-elle toujours rester éclairée, honnête et désintéressée malgré les ambitions humaines et être alors une source de joie et de libération des Hommes."

